www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

9e JAARGANG No. 4, blz. 97-124 APRIL 1947

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: HET NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

DE GRONDSLAGEN VOOR DE ONTWIKKELING VAN DE PHILIPS-HEETELUCHTMOTOR

door H. de BREY, H. RINIA en F. L. van WEENEN. 621.412

De heeteluchtmachines, die in de vorige eeuw in gebruik waren, hadden een laag rendement, en een groote zuigerverplaatsing en gewicht per PK. Een systematisch onderzoek in de Philips Laboratoria heeft aangetoond, dat tegenwoordig een heeteluchtmotor met veel gunstiger eigenschappen geconstrueerd kan worden. De toepassing van de thans beschikbare hittebestendige staallegeeringen heeft het mogelijk gemaakt, een gemiddelde effectieve druk van 14 atm te bereiken (maximale druk 50 atm) en de temperatuur van de warme ruimte tot 650 °C op te voeren. Een doelmatige constructie van de verhitter, koeler en regenerator, gebaseerd op nieuwe inzichten omtrent het compromis dat bij deze organen gesloten moet worden tusschen warmte-overdracht, stroomingsweerstand en schadelijk volume, heeft het mogelijk gemaakt om met toerentallen van 3000 omw/min en meer te werken en daarbij toch te waarborgen dat de temperatuur van het arbeidsmedium in de warme ruimte slechts weinig lager dan die van de verhitter, resp. in de koude ruimte (80 °C) slechts weinig hooger dan die van de koeler is. De hooge drukken en toerentallen hebben het specifieke vermogen ruim een factor 100 ten opzichte van de klassieke heeteluchtmotoren doen verbeteren, zoodat het nu van dezelfde orde is als bij motoren met inwendige verbranding. Het groote temperatuurverschil tusschen warme en koude ruimte maakt, dat het theoretische rendement (gelijk aan dat van het Carnotproces) hoog is. Dank zij een ingrijpende verbetering van de regenerator, verhooging van het mechanisch nuttig effect, toepassing van een doelmatig geconstrueerde voorverhitter, en de natuurlijke beperking van stralings- en andere verliezen tengevolge van de kleine afmetingen en compacte bouw der Philips-heeteluchtmotoren, is ook hun werkelijke rendement hoog; het is thans vergelijkbaar geworden met dat van motoren met inwendige verbranding. Ten opzichte van deze en andere krachtbronnen bezit echter de heeteluchtmotor een reeks principieele voordeelen.

Inleiding

In een artikel in de vorige jaargang van dit tijdschrift [1]) zijn de theoretische grondslagen van de heeteluchtmotor behandeld. Daarbij is afgeleid dat het theoretische rendement van een heeteluchtmotor met regenerator gelijk is aan dat van een Carnotproces, dat tusschen dezelfde temperaturen verloopt, en dus gelijk aan het maximum dat voor een primaire krachtbron met die temperatuurgrenzen mogelijk is. Is de absolute temperatuur van de „warme ruimte" T_w en die van de „koude ruimte" T_k, dan is dat theoretische rendement van de heeteluchtmotor gelijk aan

$$\eta = \frac{T_w - T_k}{T_w} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Voor $T_w = 920$ °K (ca 650 °C) en $T_k = 350$ °K (ca 80 °C) bijv. is $\eta = 62\%$.

Dit wijkt wel heel sterk af van de werkelijke rendementen van de vroeger geconstrueerde heeteluchtmachines, die gewoonlijk niet boven 3% uitkwamen. Dit laatste cijfer werd nog in 1923 in de catalogus van een bekende firma op dit gebied opgegeven voor een 2 PK-heeteluchtmachine. Bovendien waren de oude uitvoeringen zeer omvangrijk en zwaar. Als gewicht van de genoemde machine werd 800 kg vermeld.

In het aangehaalde artikel [1]) werd medegedeeld, dat in de Philips Laboratoria gedurende de laatste jaren een uitvoerig theoretisch en experimenteel onderzoek van het heeteluchtproces is verricht en dat daarbij is komen vast te staan, dat dit proces met veel gunstiger resultaat kan worden gebruikt, mits men bij de constructie der motoren moderne inzichten omtrent warmte-overdracht, stroomingsweerstand, enz. toepast, en zich bedient van moderne materialen. Het is zoodoende mogelijk gebleken heeteluchtmotoren te bouwen die, bij eenzelfde totaal vermogen en toerental, een vrijwel even groot rendement bezitten als normale motoren met inwendige verbranding, en per liter cylinder-

[1]) H. Rinia en F. K. du Pré, Heeteluchtmotoren, Philips techn. T. 8, 129-136, Mei 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

inhoud (of per kilo motorgewicht) een nog grooter vermogen dan deze kunnen leveren.

Wij willen thans nadere mededeelingen doen over eenige inzichten die het genoemde onderzoek heeft opgeleverd, alsmede over eenige nieuwe constructieprincipes die hieruit zijn afgeleid en die de grondslagen voor de ontwikkeling van de Philips-heeteluchtmotor vormen. Waar wij op het meergenoemde artikel [1]) teruggrijpen, zullen we dit aanhalen als „I".

Wij herhalen eerst, sterk geschematiseerd, het principe van de heeteluchtmotor. Men laat een bepaalde hoeveelheid lucht (of een ander arbeidsmedium, zooals waterstof, helium, argon of dergelijken) die zich op hooge temperatuur bevindt, in een cylinder (de warme ruimte) expandeeren, waarbij zij door verplaatsen van een zuiger mechanische arbeid verricht. De geëxpandeerde lucht wordt afgekoeld en in een andere cylinder (de koude ruimte) door een zuiger tot het oorspronkelijke volume gecomprimeerd. Vervolgens wordt zij tot de oorspronkelijke hooge temperatuur verhit. De kringloop begint dan opnieuw. De compressie van de lucht vereischt mechanische arbeid; daar deze compressie echter bij lage temperatuur en dus lage druk gebeurt, is de vereischte arbeid kleiner dan die, welke de lucht bij de expansie bij hooge temperatuur en dus hooge druk levert. De machine geeft dus een overschot aan arbeid af.

Een mogelijke uitvoeringsvorm van een heeteluchtmotor is, sterk vereenvoudigd, in *fig. 1* weergegeven. Men ziet hierin, dat het heen en weer transporteeren van de lucht uit de warme naar de koude ruimte en omgekeerd geschiedt door twee ongeveer sinusvormig bewegende zuigers, welker bewegingen ongeveer 90° in fase verschoven zijn. De vier verschillende etappes van het proces: expandeeren, afkoelen, comprimeeren, verhitten, zijn hier niet geheel te scheiden, zij loopen gedeeltelijk door elkaar. In I is aangetoond, dat desondanks de machine als motor werkt, mits aan de voorwaarde voldaan is, dat de volumevariaties van de warme ruimte in fase vóórloopen ten opzichte van die van de koude ruimte. Van de fasehoek hangt het vermogen en, in mindere mate, het rendement af. Beide vertoonen een weinig geprononceerd maximum bij een faseverschil van ca 90° (zie I, fig. 5; kiest men de fasehoek negatief, dan neemt de machine arbeid op en werkt als koelmachine).

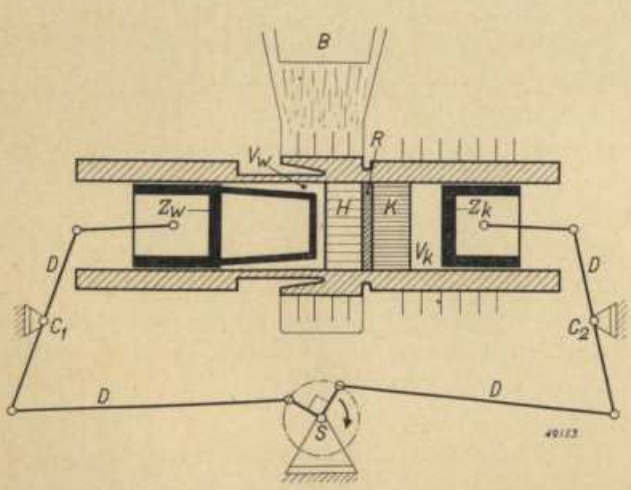


Fig. 1. Schematische voorstelling van de constructie van een heeteluchtmotor. V_w warme ruimte, V_k koude ruimte, met de bijbehoorende zuigers Z_w resp. Z_k. B brander, H verhitter, R regenerator, K koeler, S krukas, D drijfstangen, C_1, C_2 vaste draaipunten. De zuigers werken zoodanig op de krukas, dat de volumevariaties van de warme ruimte ongeveer 90° vóórloopen ten opzichte van de variaties der koude ruimte.

In fig. 1 is tusschen de gedeelten waar de lucht wordt verhit en waar zij wordt afgekoeld, de zg. regenerator geteekend. Deze heeft tot taak de warmte op te slaan die de lucht, nadat zij geëxpandeerd is, bij de overgang naar de koude ruimte moet afgeven. Gaat de lucht na de compressie weer naar de warme ruimte, dan doorloopt zij de regenerator opnieuw en krijgt hier de opgeslagen warmte terug. In I is aangetoond, en het zal uit hetgeen volgt nog nader blijken, welk een essentieele rol de regenerator vervult.

Wenden wij ons nu tot het onderzoek ter verbetering van de heeteluchtmotor, dat het onderwerp van dit artikel uitmaakt. Dit onderzoek had, zooals in verband met het in het begin gezegde duidelijk zal zijn, een tweeledige taak. De eerste opgave bestond in het verbeteren van het rendement. De tweede was het verhoogen van het specifieke vermogen (d.i. het aan de as afgegeven vermogen gedeeld door de zuigerverplaatsing). Deze twee opgaven zijn in werkelijkheid niet streng te scheiden: de maatregelen ter bevordering van de twee doelstellingen grijpen op allerlei wijzen in elkaar. Om een duidelijk beeld te kunnen geven, is het gewenscht eerst het specifieke vermogen te beschouwen.

Verhooging van het specifieke vermogen

Het vermogen van een motor is gelijk aan het product van het toerental en de arbeid per omwenteling. De laatste grootheid, die in I uitvoerig voor de heeteluchtmotor is onderzocht, wordt gegeven door het oppervlak van het p-V-diagram (indicateurdiagram), dat voor een bepaald geval in *fig. 2*, kromme H, is weergegeven. Dit oppervlak is hetzelfde als dat van de gearceerde rechthoek *abcd*, welks lengte gelijk is aan de zuigerverplaatsing

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

V_a, terwijl de hoogte wordt aangeduid als de gemiddelde effectieve druk p_m.

Het specifieke vermogen, gedefinieerd als het vermogen gedeeld door de zuigerverplaatsing V_a, is dus gelijk aan het product van toerental en gemiddelde effectieve druk p_m. Wil men het specifieke vermogen verhoogen, dan moet men trachten de beide genoemde grootheden op te voeren.

De gemiddelde effectieve druk

Bij heeteluchtmotoren wordt in het algemeen met een betrekkelijk kleine expansieverhouding gewerkt (zie I): de maximaal optredende druk is hoogstens 2 à 2,5 maal zoo groot als de minimale. Het verschil tusschen beide drukken, waarmede de gemiddelde effectieve druk p_m globaal genomen evenredig is, kan dan alleen grooter worden gemaakt door het geheele drukniveau in het p-V-diagram te verhoogen.

Alle klassieke heeteluchtmachines werkten met een hoogste druk van slechts enkele atmosferen, terwijl de laagste druk ca 1 atm bedroeg. (Gewoonlijk werd het arbeidsmedium op het oogenblik van de laagste druk even in open verbinding met de buitenlucht gebracht.) Daardoor was voor deze machines de gemiddelde effectieve druk p_m meestal niet hooger dan ca 0,6 atm.

Dat men niet tot hoogere drukken overging, was hoofdzakelijk te wijten aan het ontbreken van geschikte constructiematerialen. De warme ruimte van een heeteluchtmotor moet permanent op een hooge temperatuur staan. Tijdens de bloeiperiode van de heeteluchtmachines in de vorige eeuw beschikte men alleen over gietijzer of brons als materiaal voor de heete deelen. De trekvastheid hiervan is bij hooge temperatuur slechts gering en vooral is de kruipsnelheid bij hooge temperatuur en druk veel te groot. Men kon dus nòch de temperatuur (waarop we naar aanleiding van het rendement terugkomen) nòch de drukken zeer hoog opvoeren.

Pas omstreeks 1920 kwamen er materialen die bij hooge temperatuur een geringe kruipsnelheid vertoonden. In de laatste jaren is de techniek der hittebestendige (dwz. kruipvaste en tevens niet oxydeerende) metalen opnieuw sterk vooruitgegaan. Hierdoor was het niet alleen mogelijk om tot een veel betere constructie van de heeteluchtmotor te komen, maar ook de verwezenlijking van gasturbine, straalpijpmotor en dergelijke machines berust hierop.

Dank zij de toepassing van moderne materialen heeft men bij de door Philips ontwikkelde heeteluchtmotoren de maximale druk ongeveer even hoog kunnen opvoeren als bij de motoren met inwendige verbranding, nl. tot ca 50 atm. De minimale druk is dan ca 22 atm (expansieverhouding 2,3), en de gemiddelde effectieve druk p_m is in dat geval ca 14 atm. Deze waarde is ruim tweemaal zoo hoog als bij de normale motoren met inwendige verbranding, waar men tengevolge van de minder gunstige vorm van

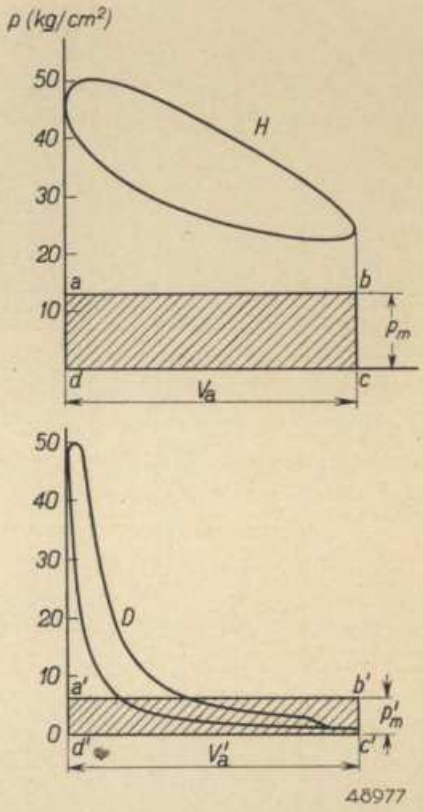


Fig. 2. Vergelijking van de indicateurdiagrammen van een heeteluchtmotor (H) en een tweetact-Dieselmotor (D). Voor beide is de maximale druk gelijk aan 50 atm gekozen, terwijl de zuigerverplaatsing V_a in beide gevallen ook gelijk ondersteld is. (Doordat de schadelijke ruimte van de heeteluchtmotor veel grooter is dan die bij de Dieselmotor, ligt het diagram voor de eerste ten opzichte van de tweede in werkelijkheid naar rechts verschoven.) In de figuur zijn ook de gemiddelde effectieve drukken p_m aangegeven: p_m is de hoogte van de rechthoek *abcd*, waarvan de basis gelijk is aan V_a en waarvan het oppervlak overeenstemt met dat van de kromme H. Evenzoo is p_m' de hoogte van de rechthoek $a'b'c'd'$, waarvan het oppervlak gelijk is aan dat van de kromme D. Het blijkt duidelijk, dat p_m aanzienlijk grooter is dan p_m'.

het indicateurdiagram een waarde p_m van de orde van 6 atm heeft. In fig. 2 zijn deze verhoudingen schematisch weergegeven. Men kan bij de verbrandingsmotoren ook wel nog iets hoogere waarden van p_m bereiken, maar dit vereischt zeer gecompliceerde hulpmiddelen (compressoren met groote luchtopbrengst [2]), eventueel gecombineerd met een uitlaatgasturbine).

---

[2]) De compressor die men voor een heeteluchtmotor noodig heeft om de eerder genoemde hooge minimum druk van bijv. 22 atm te bereiken, behoeft maar heel klein te zijn. Dit zal in een volgend artikel nog nader blijken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het toerental

Het toerental wordt hoofdzakelijk door twee factoren beperkt. Ten eerste nemen met het toerental de zuigersnelheden en dus de massakrachten van de heen en weer bewegende deelen toe. Ten tweede moet bij een hooger toerental het arbeidsmedium sneller tusschen warme en koude ruimte heen en weer stroomen, waarbij zoowel de verliezen door de stroomingsweerstand, met name van verhitter, regenerator en koeler, stijgen, alsook de vereischte warmte-overdracht in deze drie organen moeilijker te verwezenlijken is. Op deze laatste kwesties, die samenhangen met het rendement, komen wij hieronder nog uitvoeriger te spreken; wij vermelden hier slechts, dat, dank zij de door Philips ontwikkelde nieuwe constructies voor de drie genoemde organen, de problemen van stroomingsweerstand en warmteoverdracht geen beletsel vormden voor een aanzienlijke verhooging van het toerental. Wat de zuigersnelheden betreft, deze worden kleiner naarmate men het drukniveau van de heeteluchtmotor opvoert; immers, een bepaald vermogen kan dan, zooals in het voorafgaande hoofdstuk is uiteengezet, met een kleinere zuigerverplaatsing worden verkregen. Tengevolge van een en ander was het mogelijk het toerental op te voeren tot 3000 omw/min of meer. Dit leidt opnieuw tot een belangrijke vergrooting van het specifieke vermogen.

Hoe groot de vooruitgang is die op deze wijze tenslotte bereikt werd, blijkt uit een vergelijking met het in het begin geciteerde voorbeeld van de oude 2 PK-heeteluchtmachine. Deze had een zuigerverplaatsing van 25 liter. Hetzelfde vermogen is thans bereikbaar met ongeveer 200 cm^3, wanneer men de motor voor eenzelfde, zeer lange levensduur construeert. De zuigerverplaatsing is dus tot 1/125 gereduceerd. Ook het gewicht van de motor is zeer sterk verminderd; in het bovenbeschouwde geval van een 2 PK-motor is een reductie met een factor 50 bereikt [3]).

Verbetering van het rendement

Gunstige invloed van een verhoogd specifiek vermogen

In het voorgaande is een punt aangestipt waar de eischen voor een verhooging van het specifieke vermogen en voor een verbetering van het rendement met elkaar in conflict kwamen — waar nl. sprake was van de stroomingssnelheid van het arbeidsmedium. Het is echter opmerkelijk, dat op vele andere punten de eischen voor de beide doelstellingen parallel loopen. Het is bijv. duidelijk, dat, voor een gegeven vermogen, bij een kleine motor de verliezen door warmte-uitstraling geringer zullen zijn dan bij een groote. Bovendien kan men deze verliezen bij een kleine motor gemakkelijker door een warmte-isolatie tegengaan. Bij de Philips-heeteluchtmotoren wordt een en ander, zooals uit een latere beschrijving zal blijken, nog door een zeer compacte bouw bevorderd. Ook de geleidingsverliezen via de cylinderwanden zijn bij een kleine motor zooals vanzelf spreekt geringer dan bij een groote. Dit geldt speciaal, waar men bij de oude groote machines, om voldoende sterkte te verkrijgen, de metalen wanden van de heete ruimte zeer dik maakte, hetgeen nu met de moderne staallegeeringen niet meer noodig is.

Een ander punt van belang is, dat de vroegere, logge heeteluchtmotoren uitgerust moesten zijn met zware bewegende onderdeelen, waardoor groote wrijvingsverliezen optraden en het mechanisch nuttig effect, dwz. de verhouding tusschen het aan de as afgegeven vermogen en het indicateurvermogen, heel laag was. Doordat de nieuwe motoren zooveel kleiner gebouwd konden worden dan vroeger, namen de wrijvingsverliezen sterk af. Door een doelmatige constructie worden zij bij de Philips-heeteluchtmotoren bijzonder klein gehouden. Hierop zullen we thans niet ingaan, daar de eigenlijke constructie dezer motoren in een afzonderlijk artikel in dit tijdschrift zal worden behandeld. We vermelden slechts, dat voor de laatste uitvoeringen der grootste motoren (voor eenige honderden PK) het mechanisch nuttig effect meer dan 90% bedraagt.

De temperatuur van het arbeidsmedium in de warme en de koude ruimte

De verliezen die we tot nu toe hebben besproken en die vroeger alle er toe bijdroegen het bereiken van een goed rendement te beletten, zijn in hoofdzaak niet specifiek voor de heeteluchtmachine. Hun vermindering is wel van groot belang, maar de voornaamste stap vooruit in het rendement werd mogelijk gemaakt door maatregelen, die de essentieele voorwaarden voor het heeteluchtproces zelf verbeterden. Deze voorwaarden waren bij de klassieke heeteluchtmachines in tweeërlei opzicht ongunstig: ten eerste was de temperatuur (T_w) van het arbeidsmedium in de warme ruimte relatief laag, in de koude ruimte (T_k) relatief hoog; hierdoor moest blijkens verg. (1) reeds het theoretisch rendement laag zijn. Ten tweede vond een onvoldoende regeneratie plaats, of men werkte zelfs

[3]) Voor elk motortype geldt dat men het specifieke vermogen kan opvoeren en het gewicht beperken, indien men zich met een kortere levensduur (of een lager rendement) tevreden wil stellen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

geheel zonder regenerator. We beschouwen deze twee punten afzonderlijk.

Een der redenen voor de relatief lage temperaturen die men vroeger in de warme ruimte toepaste, hebben we reeds leeren kennen: het gemis van voldoende oxydatiebestendige en tevens kruipvaste materialen. De temperatuur van de wand der warme ruimte mocht daarom — reeds bij relatief geringe drukken — niet zeer hoog worden. Een andere reden was de gebrekkige warmte-overdracht aan het arbeidsmedium. Men liet de warmtetoevoer aan het medium gewoonlijk plaatsvinden via de wand van de warme ruimte zelf. Zelfs bij de lage toerentallen der oude groote machines was dit volstrekt onvoldoende, en het gevolg was dan ook, dat de temperatuur van de lucht in de warme ruimte gewoonlijk nog weer veel lager was dan de toch reeds betrekkelijk lage wandtemperatuur. De luchttemperatuur zal zelden hooger dan 300 °C geweest zijn.

Om hierin verbetering te brengen en dus, vooral ook bij hoogere toerentallen, een behoorlijke warmte-overdracht te verkrijgen, wordt — zooals reeds in I werd vermeld — een speciale verhitter aangebracht. Deze brengt de lucht aan de ingang van de warme ruimte op de gewenschte temperatuur, d.i. bij de Philips-heeteluchtmotor ca 650 °C. De constructie van de verhitter is in principe eenvoudig: een kanaal met een groot inwendig wandoppervlak, bijv. verkregen door het aanbrengen van een groot aantal inwendige ribben van voldoende lengte. De lucht moet door de nauwe spleten tusschen de ribben stroomen. Het inschakelen van een dergelijk element in de weg van het arbeidsmedium heeft echter ook nadeelige gevolgen: ten eerste wordt de stroomingsweerstand vergroot die het arbeidsmedium bij het heen en weer stroomen tusschen koude en warme ruimte ondervindt; ten tweede neemt het „schadelijke volume" toe, dat niet aan de expansie en compressie deelneemt en dat het specifieke vermogen verlaagt (zie in I, fig. 5). Het is gemakkelijk in te zien, dat deze nadeelige effecten grooter zullen worden naarmate men de warmteoverdracht van de verhitter tracht te verbeteren. Maakt men de kanalen, waar doorheen de lucht in de verhitter stroomt, zeer nauw en lang, dan kan men stellig bereiken, dat de lucht aan het eind de gewenschte temperatuur aangenomen heeft; tevens loopt men dan echter de kans, dat de stroomingsweerstand zóó groot is, dat bij de gewenschte hooge toerentallen het rendement door de aerodynamische verliezen weer geheel bedorven wordt. Probeert men anderzijds de doorgangen voor de lucht zoo wijd te maken, dat de stroomingsweerstand voldoende klein blijft, dan wordt weer het schadelijke volume zeer groot. Er moet dus een compromis worden gesloten, waarbij het op een zeer zorgvuldige dimensionneering van de verhitter aankomt. Het is één der belangrijkste taken van het door Philips ingestelde onderzoek geweest, het antagonisme tusschen warmte-overdracht, stroomingsweerstand en schadelijk volume, waarin men tot nog toe geen voldoende inzicht had, op te helderen en de voorwaarden voor het gunstigste compromis te bepalen. Hierbij is met vrucht gebruik gemaakt van de resultaten der talrijke onderzoekingen uit de laatste jaren op het gebied van warmte-overdracht en stroomingsleer, op vele punten aangevuld met de uitkomsten van eigen onderzoek.

Vooruitloopende op onze bespreking van de koeler en de regenerator kan hier reeds worden gezegd, dat zich daar hetzelfde probleem voordoet en op analoge wijze naar een gunstigste constructie dient te worden gezocht. De totale stroomingsverliezen van de motor konden met de tenslotte verkregen constructies, bij een toerental van 3000 omw/min, beperkt worden tot slechts ca 10 % van het indicateurvermogen, terwijl de warmteoverdracht, die de genoemde organen bij dit hooge toerental in minder dan 1/100 seconde moeten volbrengen, toch ten volle aan de eischen beantwoordt. Terloops zij hier opgemerkt, dat de daling van het rendement die op rekening van de aerodynamische verliezen te schrijven is, in werkelijkheid nog aanmerkelijk minder dan 10% bedraagt, omdat de stroomingsverliezen ten deele in nuttige warmte worden omgezet, nl. in de verhitter en in een deel van de regenerator.

De constructie van de verhitter is voor een bepaald geval in *fig. 3* weergegeven. Men ziet het groote aantal kanalen dat door de inwendige ribben wordt gevormd. De buitenkant van de verhitter wordt door een brander op de gewenschte temperatuur gehouden. Om ook hier de warmteuitwisseling zoo goed mogelijk te maken, is de buitenkant eveneens van ribben voorzien, die met de vlam van de brander in direct contact zijn. De inwendige en uitwendige ribben zijn van een goed warmtegeleidend materiaal vervaardigd, bijv. aluminiumbrons. Hierdoor wordt bereikt, dat het temperatuurverval in deze ribben gering is. De wand waarop de ribben zijn aangebracht, moet van hittebestendig, kruipvast staal worden gemaakt teneinde de hooge druk te kunnen uithouden. Doordat deze wand echter dun is, heeft het geringe warmtegeleidingsvermogen van dit staal weinig invloed.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Over de koude ruimte kunnen we nu kort zijn. Aan de mechanische eischen die hier aan de wand gesteld worden, kan, in verband met de lagere temperatuur, gemakkelijker worden voldaan. Wat de warmte-overdracht betreft, is echter de situatie analoog aan die voor de warme ruimte.

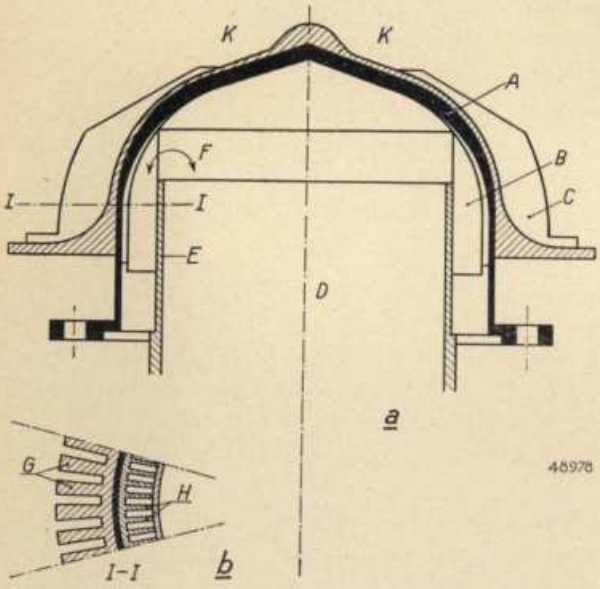


Fig. 3. Doorsnede van de verhitter van een Philips-heeteluchtmotor; *a*) verticale doorsnede, *b*) gedeeltelijke horizontale doorsnede ter hoogte *I-I*. *A* kap van hittebestendig staal voor het opnemen van de druk van het arbeidsmedium, *B* ribben van aluminiumbrons voor de warmte-uitwisseling met het arbeidsmedium (zie ook bij *H* in de horizontale doorsnede), *C* ribben van aluminiumbrons voor de warmte-uitwisseling met de vlam van de brander (zie ook bij *G* in de horizontale doorsnede), *D* warme ruimte, *E* wand van de warme ruimte. De brandstof wordt bij *K* verbrand. De vlam wordt door de spleten tusschen de ribben *G* geleid. Hierdoor worden deze, en, als gevolg van de goede warmtegeleiding, ook de ribben *H* tot de vereischte temperatuur verhit. In de spleten tusschen de ribben *H* vindt de warmte-uitwisseling met het arbeidsmedium plaats. Dit kan de warme ruimte slechts betreden resp. verlaten via de door de pijl *F* aangegeven wegen (de warme ruimte is aan de onderzijde door een hier niet geteekende zuiger resp. verdringer afgesloten).

Om in de koude ruimte een zoo laag mogelijke temperatuur T_k te bereiken en te handhaven, is aan de ingang van de koude ruimte de koeler aangebracht, waarvan de constructie groote gelijkenis vertoont met die van de verhitter. Het inwendige stemt zelfs geheel met dat van de verhitter overeen. De buitenkant van de koeler wordt met water of ook wel met lucht gekoeld.

Wij willen er nog op wijzen, dat de goede resultaten die met deze constructie van verhitter en koeler in de practijk konden worden verkregen, feitelijk te danken zijn aan de aanwezigheid van de regenerator, die de taak van beide organen zeer verlicht. Zonder regenerator zou de verhitter de lucht telkens van bijv. 100 °C tot 650 °C moeten verhitten, terwijl hij thans slechts een verhitting van ca 500 °C tot 650 °C behoeft te bewerkstelligen. Evenzoo zou zonder regenerator de koeler telkens een afkoeling van de geëxpandeerde lucht van ca 500 °C tot bijv. 60 °C moeten bewerken, terwijl thans slechts een afkoeling van ca 120 °C tot 60 °C van hem wordt verlangd. Dit zal nog duidelijker worden uit een nadere bespreking van de regenerator, waartoe wij nu willen overgaan.

De regenerator

Zooals in I en nog eens in het begin van dit artikel is uiteengezet, moet de regenerator de warmte opslaan die vrijkomt als het arbeidsmedium (de lucht) van de warme naar de koude ruimte beweegt, en hij moet deze warmte weer afstaan bij de teruggaande beweging. Hoe belangrijk de functie van de regenerator voor het heeteluchtproces is, blijkt het duidelijkst, wanneer we de verhouding uitrekenen tusschen de hoeveelheid warmte q_r die telkens in de regenerator wordt opgeslagen, en de hoeveelheid warmte q die per periode door de verhitter aan het arbeidsmedium toegevoerd wordt, aannemende dat de regenerator ideaal is. Bij de waarden voor T_w, T_k en de expansieverhouding die bij de Philips-heeteluchtmotoren gebruikelijk zijn, is de verhouding $q_r/q \approx 3$ of nog iets grooter. *Het arbeidsmedium neemt dus in de regenerator ruim driemaal zooveel warmte op als in de verhitter.* Met andere woorden, zonder regenerator zou de verhitter omstreeks viermaal zooveel warmte moeten leveren. Het rendement van de motor zou dan niet meer dan 1/4 kunnen zijn van het rendement, dat bij aanwezigheid van een ideale regenerator behaald kan worden.

Voor het kringproces, dat zich in werkelijkheid in de motor afspeelt, is de berekening van q_r/q nogal gecompliceerd. Wij zullen haar daarom slechts uitvoeren voor het in I beschreven geïdealiseerde kringproces van twee isothermen en twee isochoren, waarvoor ze heel eenvoudig is. In dat geval is $q_r = mC_v\,(T_w - T_k)$, omdat het passeeren van de regenerator bij constant volume (isochoor) geschiedt; m is gelijk aan de totale massa van de lucht, gemeten in grammoleculen. Verder is:

$$q = \int_{V_2}^{V_1} p\,\mathrm{d}V = mRT_w \int_{V_2}^{V_1} \frac{\mathrm{d}V}{V} = mRT_w \ln \frac{V_1}{V_2},$$

waarbij V_1 het maximale, V_2 het minimale volume van de lucht is. Nu is voor lucht C_v (per grammolecuul) ca $^3/_2R$. Nemen we $T_w = 920$ °K, $T_k = 350$ °K en $V_1/V_2 = 1{,}6$, dan is:

$$\frac{q_r}{q} = \frac{5}{2}\,\frac{T_w - T_k}{T_w}\,\frac{1}{\ln V_1/V_2} = 3{,}3.$$

We vinden hier dus een waarde die van dezelfde orde van grootte is als de reeds genoemde, al spreekt het vanzelf, dat de gevolgde rekenwijze slechts een grove benadering kan leveren.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Uit het bovenstaande volgt niet alleen, dat voor het behalen van een goed rendement een regenerator onmisbaar is, maar ook, dat het van het grootste belang is de regenerator zoo goed mogelijk te maken. Immers, gaat van de warmte die het arbeidsmedium aan de regenerator in bewaring moet geven en daarna weer terug moet ontvangen, 1 % verloren, dan moet de prestatie van de verhitter reeds met 3% worden vergroot en overeenkomstig daalt het rendement.

Onder deze omstandigheden doet het merkwaardig aan, dat men in het verleden de regenerator bij een heeteluchtmachine vaak geheel achterwege liet. De oorzaak moet worden gezocht in het boven reeds beschreven antagonisme tusschen de warmteoverdracht eenerzijds, stroomingsweerstand en schadelijk volume anderzijds. Men kon vroeger wel een regenerator maken met een hoog nuttig effect, maar dit bracht bij de oude constructies veelal een zoo hooge stroomingsweerstand mee, dat men het dan maar liever zonder regeneratie deed.

Gaan we nu de eischen na die gesteld moeten worden om een ideale regenerator zoo goed mogelijk te benaderen.

In de eerste plaats moet gezorgd worden, dat de warmte-uitwisseling met de lucht voldoende snel plaats heeft. Hiervoor moeten de doorstroomingskanalen in de regenerator op de juiste wijze gedimensionneerd worden, waarbij het meervermelde compromis tusschen warmte-overdracht. stroomingsweerstand en schadelijk volume naar voren komt. Bij de Philips-heeteluchtmotoren met hun hoog specifiek vermogen is de keuze van dit compromis kritischer dan het bij de oude volumineuze machines was.

In de tweede plaats is een groote warmtecapaciteit van de regenerator vereischt. Het proces van opslaan en weer afgeven van warmte verloopt bij een ideale regenerator in elke fase „omkeerbaar". Om dit te benaderen, is het noodzakelijk dat de lucht bij het stroomen door de regenerator voortdurend slechts een zeer gering temperatuurverschil met de omgeving heeft. De in de regenerator heerschende temperatuurverdeeling moet hierbij een bepaalde geleidelijke overgang vormen van de verhitter naar de koeler. Om deze temperatuurverdeeling in stand te houden en slechts geringe temperatuurschommelingen tijdens elke omwenteling van de motor te verkrijgen, moet de warmtecapaciteit van de regenerator groot zijn ten opzichte van de warmtecapaciteit van de lucht die periodiek door de regenerator heen en terug stroomt.

Tenslotte moet het warmtegeleidingsvermogen van de regenerator in de doorstroomingsrichting gering zijn; anders treedt een voortdurende warmtestroom van de verhitter naar de koeler op, die een verlies beteekent.

Het is mogelijk gebleken een regenerator te construeeren die het ideaal zeer nabij komt. In

Fig. 4. Twee regeneratoren, bestemd voor een motor van $3^1/_2$ PK (links) resp. 10 PK (rechts). In de Philips-heeteluchtmotoren stroomt de lucht van de warme naar de koude ruimte door een ringvormig kanaal, waarin de regenerator wordt geplaatst. (De erbij geteekende schaal geeft centimeters aan.)

fig. 4 is een foto van twee regeneratoren weergegeven, die voor uitvoeringen van de Philips-heeteluchtmotor met verschillende vermogens worden gebruikt. Deze regeneratoren zijn vervaardigd uit een poreuze prop dun metaaldraad. Zooals in I reeds medegedeeld is, worden daarbij waarden van 95% en meer voor het nuttig effect van de regenerator bereikt. Het is merkwaardig om zich te realiseeren, dat zulk een prop metaaldraad in staat is, de er door stroomende hoeveelheid lucht binnen 1/100 sec van ca 100 °C op ca 600 °C te brengen of omgekeerd, en dat hierin zonder noemenswaardig warmteverlies temperatuurgradienten van eenige honderden graden per cm in de doorstroomingsrichting kunnen bestaan.

De voorverhitter

Tot besluit van dit overzicht bespreken wij een rendementsverlies dat, evenals de in het begin beschouwde verliezen, niet specifiek is voor de heeteluchtmotor, maar dat bij de oude machines een zeer groote rol speelde: het warmteverlies in de schoorsteengassen, afkomstig van de brander die de verhitting bewerkstelligt. Dit verlies doet zich voor bij iedere brander. Bij de Philips-heeteluchtmotor heeft de verhitter een temperatuur van ruim 650 °C. De vlam en dus ook de verbrandingsproducten hiervan (de schoorsteengassen) hebben noodzakelijk een nog hoogere temperatuur. Laat men de schoorsteengassen ongebruikt ontwijken,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dan gaat derhalve een aanzienlijke hoeveelheid warmte verloren.

Dit verlies kan sterk beperkt worden door toepassing van een warmte-uitwisselaar, waarin de schoorsteengassen hun warmte in tegenstroom afstaan aan de toestroomende lucht die voor de verbranding noodig is.

Een dergelijke voorverhitter is ook voor de Philips-heeteluchtmotor uitgewerkt. Een bepaalde uitvoering hiervan heeft bijv. de vorm van een geplooide kraag van hittebestendige plaat, waarbij de schoorsteengassen langs de eene zijde van de plooien worden geleid, terwijl de lucht voor de verbranding aan de andere zijde stroomt. Hierdoor treedt een zeer intensieve warmte-uitwisseling op en kunnen de schoorsteenverliezen tot ca 30% van de oorspronkelijke waarde worden beperkt. In *fig.* 5 is een op deze wijze uitgevoerde, speciaal bij de constructie van de heeteluchtmotor aangepaste, voorverhitter voor gasvormige brandstof afgebeeld.

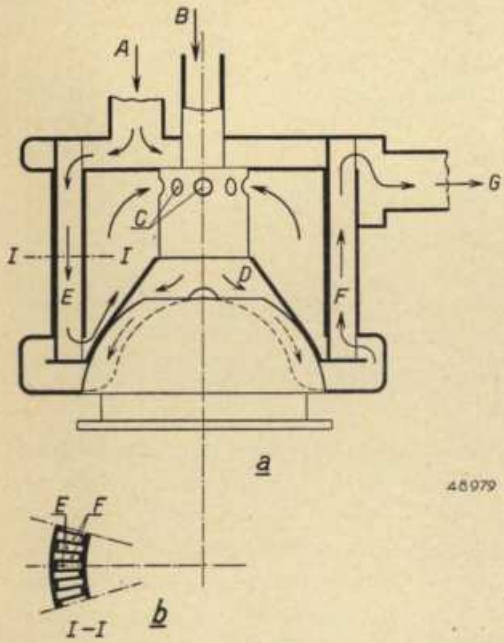


Fig. 5. Doorsnede door de voorverhitter van een Philips-heeteluchtmotor; *a*) verticale doorsnede, *b*) gedeeltelijke horizontale doorsnede ter hoogte *I-I*. Bij *A* wordt de lucht die voor de verbranding noodig is, aangevoerd. Ze volgt de door de pijlen aangegeven weg, passeert daarbij de kanalen *E* en komt via de openingen *C* in de ruimte *D*. Hier geschiedt de vermenging met het te verbranden gas, dat via *B* wordt aangevoerd, en hier heeft de verbranding plaats. De verhitter (fig. 3), waarlangs de vlam wordt geleid, is gestippeld aangegeven. De verbrandingsproducten worden via de kanalen *F* en de opening *G* weggevoerd. In de ringvormige ruimte, waarvan *E* en *F* een verticale doorsnede voorstellen, bevindt zich een geplooide kraag (vgl. ook de horizontale doorsnede). Hierin liggen de kanalen *E* en *F* afwisselend naast elkaar. Hierdoor is een zeer goede warmte-uitwisseling tusschen de toestroomende lucht en de af te voeren verbrandingsproducten gewaarborgd.

Slotbeschouwing

Vatten we de resultaten van de hier geschetste ontwikkeling samen, dan kunnen we zeggen, dat de heeteluchtmotor in de nieuwe gedaante, die hij in de Philips Laboratoria gekregen heeft, vele gunstige eigenschappen bezit welke men tot dusverre alleen bij de motoren met inwendige verbranding meende te kunnen aantreffen. Het is mogelijk gebleken volgens het principe van het heeteluchtproces compacte, lichte, snelloopende motoren van groot vermogen te bouwen, met een rendement, vergelijkbaar met dat van de verbrandingsmotoren. Tevens echter zijn bij de beschreven gedaanteverwisseling alle voordeelen, die de heeteluchtmotor principieel boven de verbrandingsmotor of andere primaire krachtbronnen bezit, behouden gebleven. We noemen hier slechts: de mogelijkheid om allerlei brandstoffen te gebruiken; geringe slijtage, daar de cylinder-loopvlakken met geenerlei corrodeerende gassen in aanraking komen; gering smeerolieverbruik; weinig lawaai, daar er geen kleppen zijn en geen periodieke explosies optreden; gelijkmatig koppel, dank zij de gunstige vorm van het indicateurdiagram (fig. 2). Andere belangrijke voordeelen zullen eerst bij een nadere behandeling van de constructie en de eigenschappen der nieuwe heeteluchtmotoren kunnen worden besproken. Wij meenen echter, dat uit het bovenstaande reeds voldoende kan blijken, dat wij hier aan het begin van een veelbelovende ontwikkeling staan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

HET ONTSTEKINGSMECHANISME VAN RELAISBUIZEN MET CAPACITIEVE ONTSTEKER

door N. WARMOLTZ.

621.3.032.43: 621.314.653

Na een korte vermelding van de voornaamste methoden om een boogontlading met kwikkathode tot stand te brengen, wordt nader ingegaan op de capacitieve ontsteekmethode. Hierbij voert men een positieve spanning van eenige kilovolt toe aan een geleider die door een dunne isoleerende wand van het kathodekwik is gescheiden. In grove trekken wordt de werking verklaard door het aannemen van veldemissie uit het bolle kwikoppervlak bij de ontstekerwand; de electronen bewegen zich langs deze wand, waarbij eventueel secundaire emissie optreedt, naar een hulpanode. De uit metingen afgeleide veldsterkte aan het kwikoppervlak is echter veel te gering om veldemissie te kunnen veroorzaken, hetgeen tegen de zoojuist gegeven voorstelling pleit. Uitkomst biedt hier de theorie van Tonks, volgens welke het kwikoppervlak bij een bepaalde (hier wel bereikte) veldsterkte instabiel wordt; kleine oneffenheden worden daarbij tot spitse puntjes uitgetrokken, aan welke de veldsterkte waarden bereikt die voor veldemissie toereikend zijn. Dit uittrekken kost tijd; dit verklaart de gemeten ontsteekvertraging. De grootte der „heuvels" (die men als aanvankelijk reeds op het kwik aanwezig moet aannemen) welke de gemeten vertraging in overeenstemming brengt met de door Tonks berekende uittrektijden, klopt met de berekende thermische oneffenheid van een kwikoppervlak. Aan het slot worden enkele toepassingen van relaisbuizen met capacitieve ontsteker besproken.

Overzicht van de ontsteekmethoden van een kwikboog

Ontladingsbuizen met een kwikplas als kathode worden reeds sedert vele jaren in de techniek gebruikt, bijv. in de vorm van kwikkathodegelijkrichters. De boogontlading gaat hierbij van een klein gebiedje van het kwikoppervlak uit, de zg. kathodevlek. Deze sterk lichtende vlek, waarin de stroomdichtheid zeer hoog is, loopt in grillige bewegingen over het kwik rond. Om haar te doen ontstaan, moet men in het algemeen bijzondere middelen aanwenden. Vroeger, en ook nu nog vaak, geschiedde deze ontsteking door contactverbreking tusschen het kathodekwik en een ontsteekelectrode, die deel uitmaakten van een stroomvoerende kring. In de loop van de tijd zijn hiervoor verschillende uitvoeringsvormen bedacht, waarvan wij hier slechts enkele willen noemen, en wel degene die berusten op

a) het kantelen van het geheele ontladingsvat, waardoor een kwikbrug tusschen de ontsteekelectrode en het kathodekwik wordt verbroken;

b) het omhoog trekken (door middel van een uitwendig aangebrachte magneetspoel) van de tot in het kwik reikende ontsteekelectrode;

c) het terugvloeien van kwik dat op de een of andere wijze omhoog gebracht was tot het met de ontsteekelectrode contact maakte.

Daar een kathodevlek slechts kan bestaan zoolang de stroomsterkte boven een bepaalde grens blijft (van de orde van 5 A), zijn kwikkathodegelijkrichters gewoonlijk voorzien van een of meer hulpanoden, welker stroom de kathodevlek in stand houdt, ook al zou de stroom der hoofdanode(n) onder de critieke grens dalen. Hierdoor voorkomt men dat in dit laatste geval het ontsteekmechanisme opnieuw in werking zou moeten treden. De permanente hulpontlading heeft echter eenige nadeelen, zooals:

1) de voortdurend aanwezige ionisatie verhoogt de kans op terugslag (stroomdoorgang in de verkeerde richting);
2) het energieverbruik van de hulpontlading is niet te verwaarloozen, althans bij gelijkrichters voor klein vermogen.

In de laatste tientallen jaren is een groote belangstelling ontstaan voor ontladingsbuizen waarin men de stroomdoorgang op nauwkeurig bepaalde tijdstippen kan laten beginnen (relaisbuizen). Zulke buizen zijn feitelijk nagenoeg traagheidslooze schakelaars. In principe kan men er de bovengenoemde gelijkrichters met kwikkathode, voor gebruiken, als deze voorzien zijn van stuurroosters. Bij de zooeven genoemde bezwaren, verbonden aan de permanente hulpontlading, voegt zich dan echter nog een derde, nl. dat de hiervan afkomstige ionen een kans scheppen op ontladingen (in de goede richting) op oogenblikken, waarop deze ongewenscht zijn.

Om al deze redenen was het gewenscht, van de permanente kathodevlek af te stappen en te zoeken naar methoden om deze vlek telkens slechts dan te vormen als zij noodig is. Wij noemen dit be-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

stuurde ontsteking. Men kan er een relaisbuis bijv. iedere periode van de gebruikte wisselspanning opnieuw mee ontsteken. Stuurroosters zijn hierbij in principe overbodig geworden, daar hun functie: het op bepaalde tijdstippen de stroomdoorgang vrijgeven, door de ontsteekinrichting wordt vervuld.

Bestuurde ontsteking

De bovengenoemde ontsteekmethoden zijn wegens de mechanische traagheid en de op het kwikoppervlak aanwezige golven ongeschikt voor bestuurde ontsteking. Er zijn echter twee andere methoden ontwikkeld die deze bezwaren niet hebben. De oudste hiervan is die waarbij men een uitwendige ontsteekband toepast; zij werd reeds in 1901 door Cooper Hewitt bekend gemaakt [1]). In dit artikel zullen wij een gewijzigde vorm van deze capacitieve ontsteker behandelen. De andere methode, waarop wij hier niet ingaan, is in 1933 door Slepian en Ludwig gevonden [2]); zij maakt gebruik van een halfgeleider, die ten deele in het kathodekwik is gedompeld.

Fig. 1a laat een principeteekening van een buis met de oorspronkelijke ontsteekband zien. Ter hoogte van de kwikmeniscus is om de glazen ballon van de ontladingsbuis een geleidende band aangebracht. Door hieraan een ten opzichte van het kathodekwik positieve spanningsstoot van voldoende grootte toe te voeren, ontstaat bij de glazen wand op het kwik een vonkje, dat in een kathodevlek overgaat, waarvan de anode de ontlading overneemt. Om de ontsteking vlot te doen geschieden, verdient het aanbeveling, vooral bij lage anodespanningen, een hulpanode te gebruiken, die met een punt van hooge spanning is verbonden, bijv. met de ontsteekband zelf.

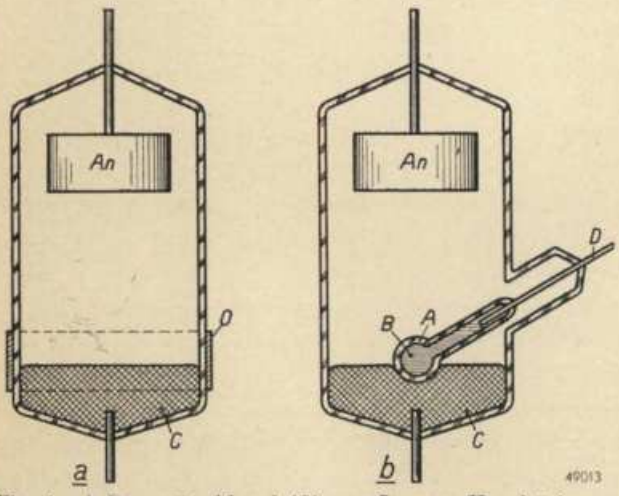


Fig. 1. *a*) De ontsteekband (*O*) van Cooper Hewitt is een metalen band, die ter hoogte van de meniscus van het kathodekwik *C* buiten om de glazen ontladingsbuis is gelegd. Een aan *O* toegevoerde spanningsstoot van ca 10 kV, positief ten opzichte van *C*, veroorzaakt op het kwik aan de glazen wand een kathodevlek, waarna zich een ontlading naar de anode *An* ontwikkelt, die de ontlading verder in stand houdt.
b) Schets van een inwendige capacitieve ontsteker. *A* isoleerende wand, *B* geleider, *C* kwikkathode, *D* spanningstoevoer van de ontsteker.

Later is door verschillende onderzoekers de in fig. 1*b* geschetste vorm van een inwendige capacitieve ontsteker aangegeven. Een isoleerend buisje,

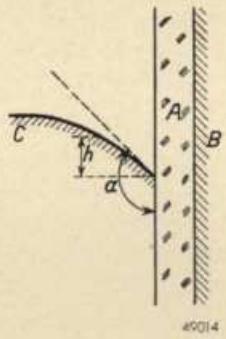


Fig. 2. Vorm van de kwikmeniscus aan de ontsteker. De letters *A*, *B* en *C* hebben dezelfde beteekenis als in fig. 1*b*. α is de zg. grenshoek, waarvan de grootte voor verschillende stoffen verschillend is en die voor de combinatie kwik-kwarts ca 135° bedraagt. De plaats van een punt op het bolle kwikoppervlak is bepaald door de hoogte *h* boven de grenslijn van het kwik en de ontstekerwand.

bijv. van kwarts, gevuld met een geleider, is gedeeltelijk in het kathodekwik gedompeld. Een positieve spanningsstoot van voldoende grootte op de inwendige geleider doet aan de buitenzijde van het buisje een kathodevlek ontstaan. Ook hier kan een hulpanode wenschelijk zijn; als zoodanig kan het niet-geïsoleerde deel van de toevoerpool (fig. 1*b*) dienst doen.

De vonk waaruit de kathodevlek voortkomt, wordt gevormd in de spleet tusschen de bolle kwikmeniscus en de isoleerende wand van de ontsteker. *Fig. 2* geeft een vergroot beeld van deze spleet. Op de verschijnselen die hierin plaats vinden, komen wij aanstonds terug.

Schets van het ontsteekproces

Van het ontsteekproces kan men zich in groote trekken het volgende beeld vormen. De positieve spanning op de geleider binnen in de ontsteker heeft een electrisch veld in de genoemde spleet ten gevolge, dat bij voldoende sterkte een veldemissie (ook wel koude emissie genoemd) van electronen uit het kwik veroorzaakt. Deze electronenstroom loopt naar de zich op een positieve potentiaal bevindende ontstekerwand en wordt hierlangs voortgeleid (waarschijnlijk dank zij het optreden van secundaire emissie) naar hooger gelegen en zich op hoogere positieve potentiaal bevindende gedeelten van die wand, tot hij de hulpanode bereikt. De electronen ioniseeren op hun weg kwikatomen; hierdoor gaat de electronische ontlading in een boogontlading over. Het ontstaan van een boog uit

[1]) U.S. patent 682691.
[2]) Trans. A.I.E.E. **52**, 693, 1933.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

glimlicht [3]) moet hier uitgesloten worden geacht; de in het onderhavige geval heerschende druk (verzadigde kwikdamp van omstreeks kamertemperatuur), de electrodenafstanden en de spanningen (lager dan 10 kV) zijn te gering voor het ontstaan van glimlicht.

Dit beeld mag in hoofdzaak juist worden geacht, als de beide volgende vragen bevestigend kunnen worden beantwoord:

1) Kan bij een opstelling analoog aan de gebruikte, doch in vacuo (om de complicaties van de gasontlading te vermijden), door veldemissie een stroom naar een hulpanode tot stand komen?
2) Is bij de gebruikelijke capacitieve ontstekers in kwik veldemissie mogelijk bij de daar voorkomende veldsterkten?

Wij zullen nu eenige proeven [4]) beschrijven, waaruit men inderdaad tot een bevestigend antwoord op de eerste vraag moet concludeeren. Wat de tweede vraag betreft, het antwoord hierop schijnt aanvankelijk ontkennend te moeten luiden. Door echter een bepaald mechanisme te onderstellen, dat aan de veldemissie vooraf gaat, wordt deze moeilijkheid opgelost en tevens de straks te behandelen ontsteekvertraging verklaard.

Verificatie van het gegeven beeld van de ontsteking

Electronenemissie in vacuo

Fig. 3 is een schets van de buis waarmee wij het optreden van veldemissie aantoonden. Het naar binnen gestulpte deel *A* van de glazen ballon komt in functie overeen met de ontstekerwand *A* van fig. 1*b*. De inwendige geleider bestaat uit een kabel van gevlochten koperdraad, die los in de instulping is gestoken. Daar wij voor deze proef de aanwezigheid van gas willen vermijden, mag er geen kwik in de buis zijn. Als kathode doet daarom een op de instulping aangebrachte laag grafiet dienst, waarmee een spiraalveer contact maakt. Er is een anode aangebracht, die met de inwendige geleider is verbonden. De buis wordt geëvacueerd tot een druk van 10^{-5} mm Hg of lager. Bij aanleggen van een gelijkspanning van de orde van eenige duizenden volt tusschen het grafiet en de inwendige geleider (de laatste positief) constateert men een stroom over de anode. Deze stroom blijft bestaan, als men de geleider uit de instulping neemt. Was hij echter tevoren daar niet in geplaatst, dan komt er geen stroom tot stand.

[3]) Zie bijv. M. J. Druyvesteyn en J. G. W. Mulder, Philips techn. T. **2**, 122, 1937.

[4]) Zie voor een uitvoeriger beschrijving van deze proeven (en andere op hetzelfde gebied): N. Warmoltz, Over het mechanisme van den capacitieven ontsteker en van den weerstand-ontsteker bij kwikdampgelijkrichters, dissertatie Delft 1946.

We verklaren dit op de volgende wijze: aan het ruwe grafietoppervlak heerscht, als de inwendige geleider er vlak tegenover in de instulping staat, een voldoend hooge veldsterkte om veldemissie te doen ontstaan; de geëmitteerde electronen begeven zich naar de vacuumzijde van de glazen instulping;

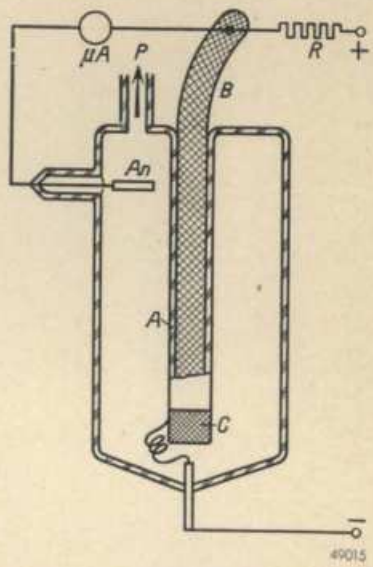


Fig. 3. Proef voor het aantoonen van veldemissie in vacuo. De instulping *A* van een glazen ballon is aan het einde met een laag grafiet *C* bedekt, waarmee een spiraalveer contact maakt. De ballon wordt vacuum gepompt door de pompstengel *P*. In de instulping *A* is een kabel *B* van gevlochten koperdraad gestoken, die over een galvanometer met de anode *An* en over een weerstand *R* van 100 megohm met de positieve pool van een gelijkspanningsbron is verbonden. De negatieve pool hiervan ligt aan *C*. Bij een spanning van eenige kilovolt meet men een stroom over *An*, die blijft bestaan, als men de geleider *B* uit de instulping *A* neemt. Deze stroom komt echter alleen dan tot stand, als *B* zich in *A* bevindt.

zij zouden deze negatief laden en zoodoende het veld afschermen, als er daar geen secundaire emissie optrad om de wandoppervlakte toch op een hooge positieve potentiaal te houden. Eventueel herhaalt zich dit proces een of meer malen, tot ten slotte de secundaire electronen de anode bereiken.

Dat ook na verwijdering van de geleider de stroom blijft doorgaan, ondersteunt de onderstelling van secundaire emissie. Hoe zou nl. het grafiet electronen kunnen blijven emitteeren, als niet de wand *A* (fig. 3) op een hooge potentiaal werd gehouden! Dit is alleen mogelijk, als hier secundaire emissie optreedt. Maar om de ontlading op gang te brengen, is de inwendige geleider noodig, daar anders niet de voor veldemissie noodzakelijke veldsterkte aan de kathode tot stand komt.

Wenden wij ons nu tot de tweede der bovengestelde vragen: of bij de gebruikelijke ontstekers de voorkomende veldsterkten voldoende zijn om veldemissie te doen optreden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De veldsterkte aan de kathode

Met de zoojuist beschreven proef is principieel het optreden van veldemissie, eventueel gevolgd door secundaire emissie van de ontstekerwand, aangetoond. Er bestaan echter nog belangrijke verschillen tusschen de situatie bij deze proef en die

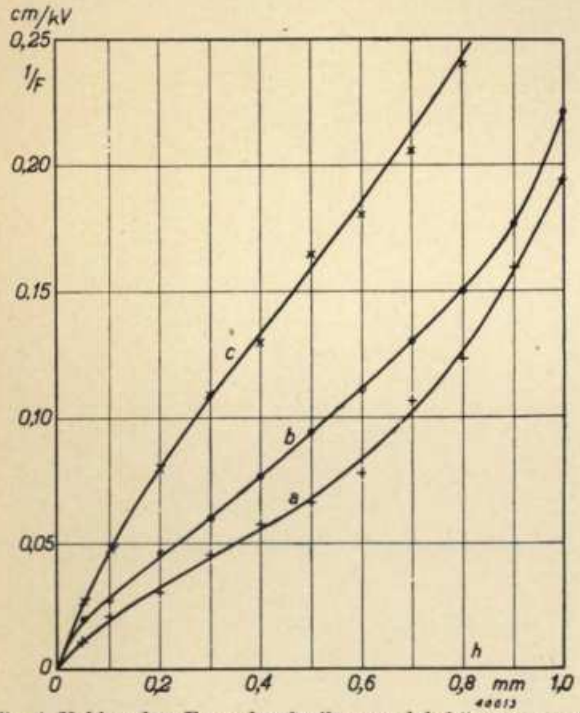


Fig. 4. Veldsterkte F aan het kwikoppervlak bij een spanning van 1 kV op de ontsteker. Uitgezet is $1/F$ (F in kV/cm) als functie van de hoogte h boven de grenslijn kwik-ontstekerwand. De krommen a, b en c gelden voor wanden met $\varepsilon = 4{,}4$, die resp. 0,35 mm, 1,0 mm en 3,0 mm dik zijn. Zij zijn afgeleid uit metingen, beschreven in het in noot [5]) aangehaalde artikel.

van een in kwik gedompelde ontsteker. Over de veldsterkte aan het kathode-oppervlak in dit laatste geval kan de proef van fig. 3 ons niet veel leeren. Ten eerste was daar niet een spleet aanwezig, zooals die bij een kwikmeniscus optreedt (fig. 2), en in de tweede plaats was het grafietoppervlak ruw, terwijl het kwik althans oogenschijnlijk glad is. Het is bekend dat aan een ruw oppervlak plaatselijk hoogere veldsterkten aanwezig zijn dan aan een glad.

De veldsterkte aan het glad onderstelde kwikoppervlak kan worden afgeleid uit de potentiaalverdeeling in de ruimte tusschen de meniscus en de ontsteker. Metingen dienaangaande, uitgevoerd aan modellen in een electrolytische trog, zijn reeds in dit tijdschrift beschreven [5]). Hieruit is de veldsterkte F aan het kwikoppervlak afgeleid, als functie van de hoogte h boven de grenslijn kwik-ontstekerwand, en voor een gegeven potentiaalverschil (1 kV) tusschen het kwik en het inwendige van de ontsteker. Het resultaat hangt nog af van de dikte en van de diëlectrische constante ε van de ontstekerwand. Voor kwarts ($\varepsilon = 4{,}4$) met dikten van 0,35 mm, 1,0 mm en 3,0 mm zijn krommen gegeven in *fig. 4*, waar $1/F$ (om beter naar kleine waarden van h te kunnen extrapoleeren) als functie van h is uitgezet.

Als volgende stap moeten wij de plaats kennen waar de vonk ontstaat. Deze plaats (vastgelegd door de hoogte h boven de grenslijn) is, met behulp van een vergrootende kijker, rechtstreeks bepaald. Wij gebruikten daarbij een ontsteekband volgens fig. 1*a*. De band bestond uit een laagje zilver, zoo dun dat het doorzichtig was, zoodat de hoogte waarop de vonk ontstond, goed kon worden waargenomen. Deze hoogte bleek, bij een gegeven ontsteker, af te hangen van de grootte van de spanning V die men aan de ontsteker toevoert. *Fig. 5* laat voor een bepaald geval (wand van 0,35 mm kwarts) dit verband tusschen h en V zien. Hoe grooter V is, hoe dieper in de spleet de vonk ontstaat.

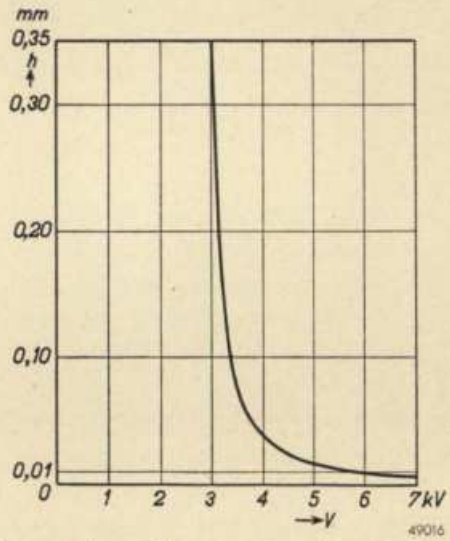


Fig. 5. Gemeten hoogte h, waarop de vonk op het kathodekwik ontstaat (bij een gegeven ontsteker), als functie van de spanning V, die tusschen de ontsteker (+) en het kathodekwik (—) wordt aangelegd.

Door combinatie van fig. 4 en 5 vindt men de veldsterkte aan het kwik op de plaats waar de vonk ontstaat. Zoo vinden we, bij een wand van 0,35 mm kwarts, met waarden van V van 3,00 tot 6,55 kV, uit fig. 5 de in *tabel I* aangegeven waarden van h, waarbij volgens fig. 4 de in de onderste regel van de tabel vermelde waarden van de veldsterkte F behooren.

Kan men bij deze veldsterkten veldemissie verwachten? Haefer heeft de hiervoor benoodigde

[5]) N. Warmoltz, De potentiaalverdeeling bij de ontsteker van een relaisbuis met kwikkathode, Philips techn. T. 8, 346, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel I. Hoogte h waarop de vonk ontstaat, en veldsterkte F aan het kwik, voor eenige waarden der spanning V op een ontsteker met een wand van 0,35 mm kwarts.

V (in kV) =	3,00	3,15	3,55	4,50	6,55
h (in mm) =	0,35	0,21	0,065	0,025	0,008
F (in kV/cm) =	50	94,5	255	750	2500

veldsterkte bepaald aan wolfraam [6]). Zijn uitvoerige metingen zijn in overeenstemming met wat men theoretisch kan afleiden. Hij vond bijv. dat bij een veldsterkte van $3 \cdot 10^4$ kV/cm een stroomdichtheid van 45 A/cm² optreedt, doch bij een 3 maal zoo kleine veldsterkte nog slechts $3 \cdot 10^{-16}$ A/cm². Hetzelfde geldt voor kwik, waarvan de uittreedarbeid (4,4 V) nagenoeg dezelfde is als die van wolfraam. De boven gevonden veldsterkten van rond 10^2-10^3 kV/cm kunnen dus geen noemenswaardige veldemissie veroorzaken. Hoe deze moeilijkheid bevredigend kan worden opgelost, zullen wij aanstonds zien.

De ontsteekvertraging

Indien de ontsteking inderdaad volgens het boven geschetste proces verloopt, zou men a priori geen grootere ontsteekvertraging (tijdsduur noodig voor het tot stand komen van de ontlading, gerekend van het moment af waarop de ontsteekspanning wordt aangelegd) verwachten dan de tijd waarin de electronenstroom overgaat in een boog (d.i. de opbouwtijd van de gasontlading). Nu is uit metingen van verschillende onderzoekers aan de vonk in een geëvacueerde buis gebleken dat deze opbouwtijden zeer kort zijn, namelijk van de orde van 10^{-7} sec. Niettemin blijken uit oscillogrammen van de spanning aan de ontsteker veel grootere vertragingen te kunnen optreden, zooals

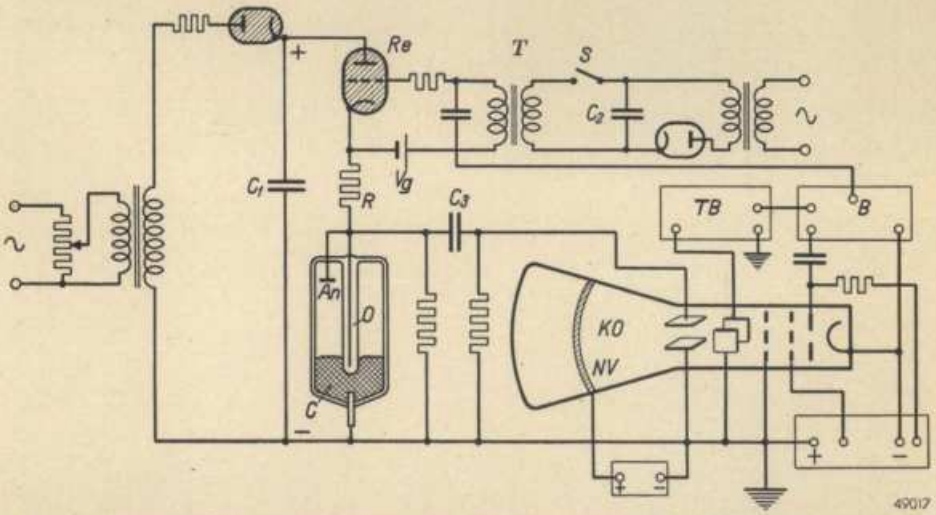


Fig. 6. Schakeling voor het meten van de ontsteekvertraging. De condensator C_1, door een gelijkrichter tot een regelbare spanning geladen, kan zich ontladen over de relaisbuis Re, de weerstand R en de te onderzoeken buis met anode An, ontsteker O en kwikkathode C. De ontlading wordt tot stand gebracht door de sleutel S neer te drukken, waardoor de condensator C_2 zich door de primaire spoel van de transformator T ontlaadt; de hierdoor in de secundaire spoel opgewekte spanningsstoot brengt de relaisbuis Re tot ontsteken, welke tevoren door de negatieve roosterspanning V_g geblokkeerd werd gehouden. Het verloop van de spanning aan de ontsteker wordt bekeken op de kathodestraaloscillograaf KO, die over de capacitieve koppeling C_3 met An is verbonden. Daar de lichtvlek het oscillogram slechts één maal beschrijft, is voor het verkrijgen van een voldoend helder beeld een kathodestraalbuis met naversnelling (NV) toegepast [7]). Op niet nader aangegeven wijze stelt de spanningsstoot van T tegelijk de generator B van een spanning met rechthoekige vorm in werking. Deze spanning geeft de electronenstraal vrij en doet tevens een geijkte tijdbasis (TB) functionneeren.

met de apparatuur van *fig. 6* kon worden aangetoond. Deze is in het onderschrift nader verklaard.

Ter contrôle werd eerst de vertragingstijd gemeten van een vonk tusschen twee bolletjes van wolfraam in vacuo. Bij een afstand van 0,25 mm tusschen de bolletjes trad bij 15 kV doorslag op. De vertragingstijd bedroeg $2 \cdot 10^{-7}$ sec, in overeenstemming met de uitkomsten van de zooeven genoemde onderzoekers.

Bij metingen aan de in fig. 6 geschetste ontladingsbuis zijn oscillogrammen verkregen, waarvan *fig. 7a-d* er enkele weergeeft; de tijdschaal is vastge-

[6]) Z. Phys. **116**, 604, 1940.

[7]) Een kathodestraalbuis met naversnelling is beschreven in Philips techn. T. **5**, 257, 1940.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

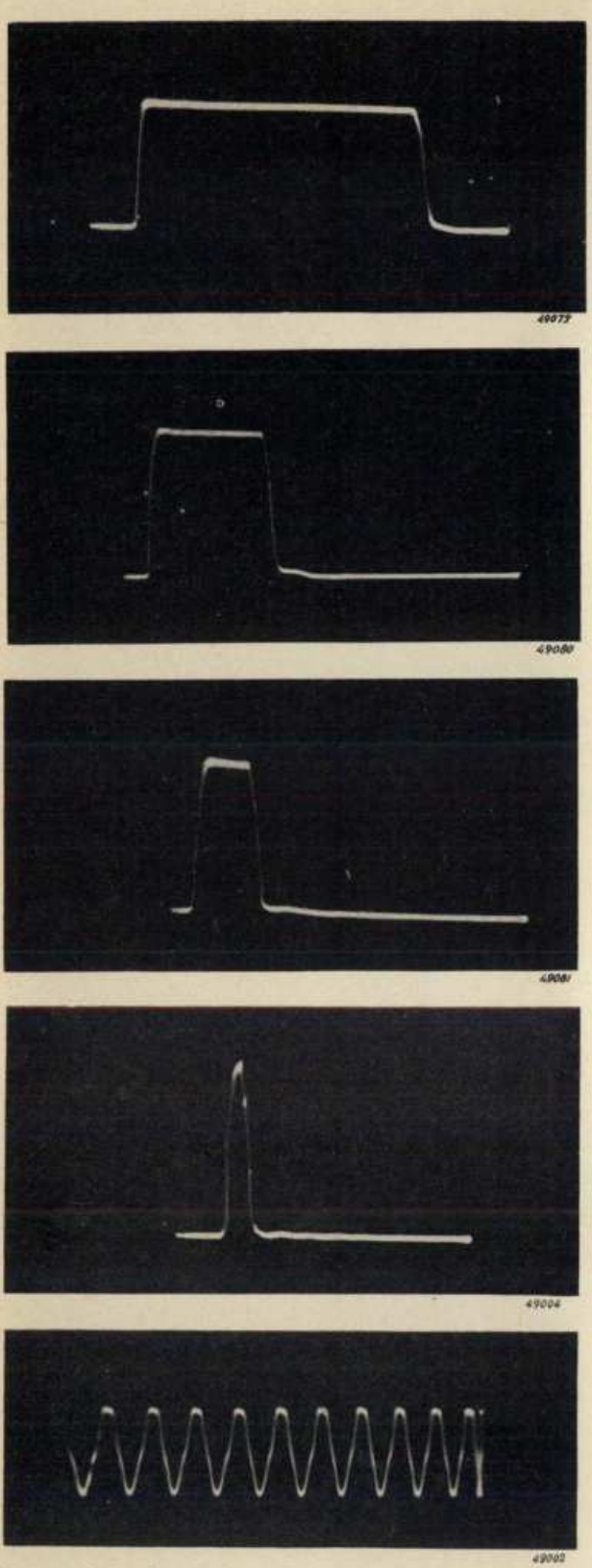


Fig. 7. *a-d*) Oscillogrammen van de spanning tusschen de ontsteker en een kwikkathode met bolle meniscus. De aan de ontsteker toegevoerde spanning V bedroeg bij (*a*) 5,5 kV, bij (*b*) 6 kV, bij (*c*) 8 kV, en bij (*d*) 10 kV. De lengte van het horizontale gedeelte is de eigenlijke ontsteekvertraging (T). De tijdschaal is gegeven door het oscillogram (*e*) van een wisselspanning met de frequentie 10^6 per/sec. De schaal der ordinaat is in de figuren *a-d* niet geheel dezelfde. Deze oscillogrammen zijn, evenals die van fig. 9, opgenomen met een kathodestraalbuis werkend met een versnellingsspanning van 10 000 V.

legd door fig. 7*e*, het oscillogram van een wisselspanning met een frequentie van 10^6 per/sec. Zooals men ziet, hebben de oscillogrammen van de spanning aan de ontladingsbuis een ongeveer trapeziumvormig verloop; in een zeer korte tijd (hier ca $5 \cdot 10^{-8}$ sec), die in hoofdzaak door de capaciteit van de ontsteker en de weerstand van de keten is bepaald, stijgt de spanning op de ontsteker tot een waarde, die een zekere tijd — die wij de eigenlijke ontsteekvertraging T noemen — constant blijft; daarna daalt zij in 10^{-6}-10^{-7} sec tot de boogspanning in kwikdamp bij lage druk. T neemt af bij stijgende spanning V op de ontsteker. In *fig. 8* is T als functie van V uitgezet, voor vier verschillende dikten van de ontstekerwand.

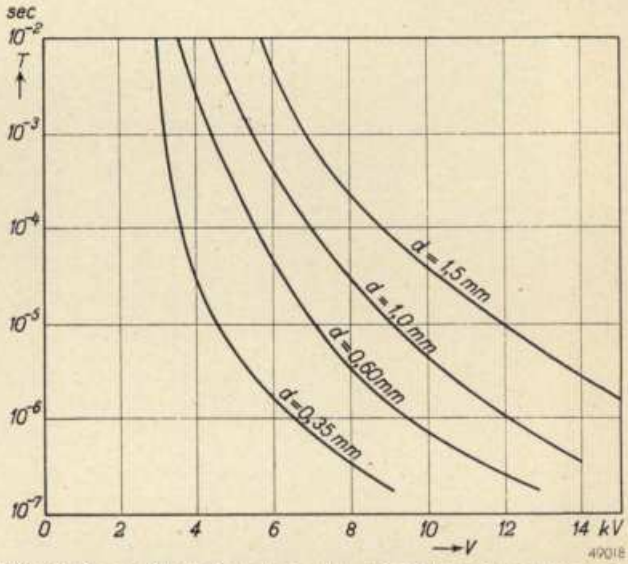


Fig. 8. De oscillografisch bepaalde eigenlijke ontsteekvertraging T als functie van de spanning V, die aan de ontsteker wordt toegevoerd; d is de dikte van de ontstekerwand.

Een geheel ander beeld vertoonen de oscillogrammen, als het kwik de ontsteker bevochtigt, dwz. als de kwikmeniscus bij de ontsteker niet bol, maar hol is, zooals zich bij bepaalde verontreinigingen van de ontstekerwand kan voordoen. Ook dan blijkt de ontsteker te functionneeren. *Fig. 9a* laat zien dat zelfs bij de lage spanning van 1,2 kV geen eigenlijke ontsteekvertraging optreedt (men lette er op dat de tijdschaal hier anders is dan in fig. 8; zij wordt gegeven door fig. 9*b*, het oscillogram van een wisselspanning met de frequentie 10^7 per/sec).

De microscopische vervorming van het kwikoppervlak

Wij hebben de verificatie van het beschreven ontstekingsmechanisme hierboven afgebroken met de constateering dat men, uitgaande van een glad kwikoppervlak, veldsterkten vindt die veel te klein zijn

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

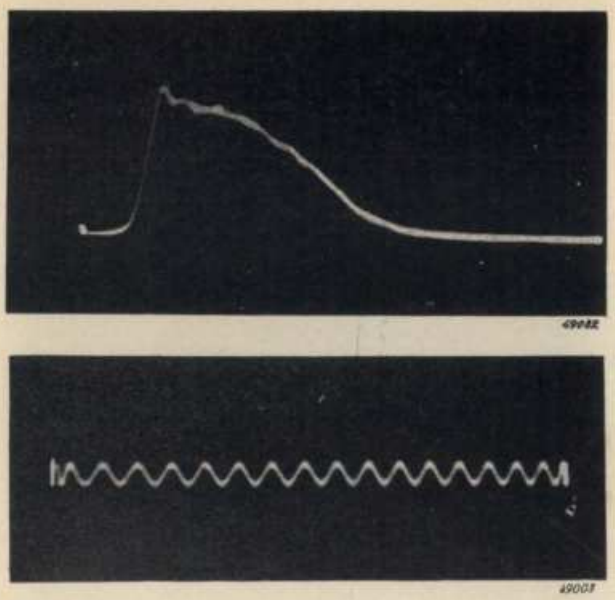


Fig. 9. *a*) Oscillogram van de spanning tusschen ontsteker en kwikkathode met holle meniscus. Hier treedt geen ontsteekvertraging op, hoewel de toegevoerde spanning zeer laag is, nl. 1,2 kV. (N.B. Andere tijdschaal dan in fig. 8 *a-d*!)
b) Dit oscillogram van een wisselspanning met frequentie 10^7 per/sec geeft de tijdschaal voor oscillogram (*a*).

voor een noemenswaardige veldemissie van electronen. De zoojuist besproken ontsteekvertraging levert de sleutel tot het oplossen van deze moeilijkheid. We kunnen deze vertraging namelijk interpreteeren als de tijd die noodig is om de door het electrische veld uitgeoefende kracht op het oorspronkelijk macroscopisch gladde kwikoppervlak spitse punten te doen vormen, waaraan de veldsterkte wèl de voor veldemissie vereischte waarde bereikt.

Tonks heeft berekend welke minimale veldsterkte en welke tijd noodig zijn om kleine verstoringen op een kwikoppervlak tot punten uit te trekken [8]). Zulke verstoringen zijn steeds aanwezig ten gevolge van de Brownsche beweging (thermische oneffenheden). Voor de genoemde minimale veldsterkte vond hij de waarde van 53 kV/cm. Bij grootere veldsterkten wordt het kwikoppervlak instabiel, dàar bij een kleine verstoring van het evenwicht de uittrekkende kracht sneller toeneemt dan de tegenwerkende kracht (capillaire kracht en zwaartekracht). De benoodigde tijd is afhankelijk van de veldsterkte en van de grootte der oorspronkelijke oneffenheden. Zoo zou bijv. door een veld van 2 MV/cm een „heuvel" met een hoogte van 10^{-7} cm en een straal van 10^{-3} cm in een tijd van $2{,}3 \cdot 10^{-6}$ sec tot een punt worden uitgetrokken.

Naar aanleiding hiervan hebben wij deze verschijnselen onderzocht aan een vereenvoudigde opstelling, waarbij de veldsterkte direct bekend was en de boogvorming, door afwezigheid van het diëlectricum van een ontsteker, eenvoudiger verloopt. De kathodevlek werd hierbij gevormd door een hooge positieve spanning toe te voeren aan een electrode, die op korte afstand boven het kwik was geplaatst.

Voor de practijk is deze methode van ontsteken ongeschikt, daar men, om de benoodigde veldsterkte te verkrijgen, is aangewezen op het gebruik van òf zeer hooge spanningen, òf zeer kleine afstand. Dit laatste komt in het geheel niet in aanmerking wegens de veranderingen van het kwikniveau door verdampen of condenseeren van kwik en wegens het optreden van golven op het kwik door mechanische trillingen.

In *fig. 10* is de gebruikte proefbuis geschetst. Een bandje van wolfraam bevindt zich op een geringe afstand (0,25-0,125 mm) boven het kwikoppervlak. Het geheel moet zorgvuldig trillingsvrij worden opgesteld [9]) om deze afstand niet door rimpels op het kwik te laten varieeren.

De volgens fig. 7 gemeten ontsteekvertragingen zijn door de getrokken lijn in *fig. 11* als functie van de veldsterkte F aan het (nog gladde) kwikoppervlak weergegeven. De gestippelde lijnen in dezelfde figuur stellen de tijden voor waarin volgens de berekeningen van Tonks kwikheuvels tot punten worden uitgetrokken; de parameter is de hoogte der heuvels. Interpreteeren we de gemeten vertragingstijden geheel als „uittrektijden", dan stemmen

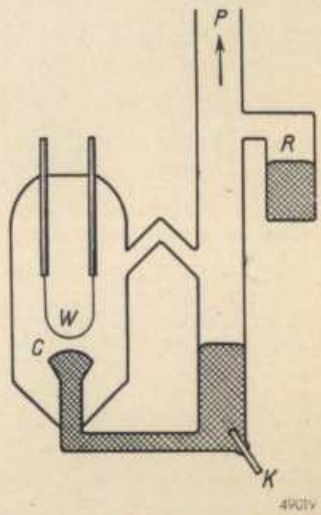


Fig. 10. Proefbuis voor het meten van de ontsteekvertraging in vereenvoudigde omstandigheden. Het kwikniveau bij C wordt zoodanig ingesteld (grof door toevoegen van kwik uit het reservoir R, fijn door de buis eenigszins schuin te plaatsen) dat dit het bandje van wolfraam W tot op 0,25-0,125 mm nadert. Het bandje W wordt vóór iedere meting electrisch gegloeid, teneinde het geheel van kwik te ontdoen. K stroomtoevoer, P pompstengel.

[8]) Phys. Rev. **48**, 562, 1935.

[9]) Een zeer geschikte opstelling hiervoor is bijv. de door J. A. Haringx beschrevene, zie Philips techn. T. **9**, 16 en 85, 1947 (no. 1 en 3).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

onze metingen met de uitkomsten van Tonks overeen, als we de oorspronkelijke hoogte der heuvels op 10^{-8} cm stellen, waarden waartoe ook Gans is gekomen bij zijn berekening van de oneffenheid van een kwikoppervlak door de Brownsche beweging [10] [11].

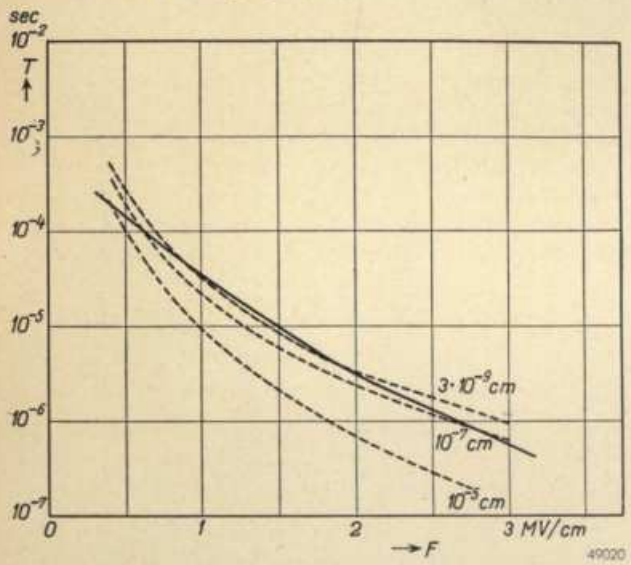


Fig. 11. Getrokken lijn: aan de buis van fig. 10 gemeten ontsteekvertraging als functie van de veldsterkte F aan het (nog gladde) kwikoppervlak.
Stippellijnen: uit de berekening van Tonks volgende tijden waarin kwikheuvels tot punten worden uitgetrokken, als functie van F, met de hoogte der heuvels als parameter. Overeenstemming met de getrokken lijn bestaat, als men de hoogte der heuvels op 10^{-8} cm stelt.

De ontsteekvertragingen, waargenomen aan de buis van fig. 10, zijn hiermee bevredigend verklaard. Bij de buizen met capacitieve ontstekers — waar het eigenlijk om te doen is — vormt weliswaar de isoleerende ontstekerwand een complicatie, maar het is niet te verwachten dat deze wand het mechanisme aan het kwikoppervlak essentieel zal beïnvloeden. Uit de volgende meetresultaten moge dit nog blijken.

Aan een aantal ontstekers met wanddikten d varieerende van 0,35 tot 3,0 mm is bepaald bij welke veldsterkte F vertragingstijden T van $5\cdot10^{-3}$, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5} en 10^{-6} sec optreden. Zooals *fig. 12* laat zien, is de invloed van de wanddikte slechts gering.

Neemt men bij iedere vertragingstijd het gemiddelde (F_1) van de weinig uiteenloopende veldsterkten voor de vijf wanddikten, en vergelijkt men deze waarden F_1 met de veldsterkten F_2 die men bij de buis volgens fig. 10 noodig heeft om dezelfde vertragingen T te krijgen, dan blijken de beide series uitkomsten (zie *tabel II*) geheel van dezelfde orde van grootte te zijn.

[10]) Ann. Phys. (Leipzig) **74**, 231, 1924.
[11]) Een uitvoeriger beschrijving van deze verschijnselen zal verschijnen in Philips Research Reports.

Tabel II. Veldsterkte F_1 in het geval van een buis met een ontsteker, vergeleken met de veldsterkte F_2 in de buis volgens fig. 10, beide zoo gekozen dat eenzelfde ontsteekvertraging T optreedt.

T (sec) =	$5\cdot10^{-3}$	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
F_1 (kV/cm) =	58	117	286	725	2462
F_2 (kV/cm) =	60	125	625	1500	2700

Hieruit mag men de gevolgtrekking maken dat de veldemissie op een kwikoppervlak bij een ontstekerwand op dezelfde wijze tot stand komt als in het geval van een boven het kwik geplaatste ontsteekelectrode.

Wij moeten nu nog even terugkomen op de metingen van fig. 9*a*, die betrekking hadden op een holle kwikmeniscus. Dat hierbij geen ontsteekvertraging werd gevonden, is geenszins in strijd met het bovenstaande. Daar immers de grenshoek α (fig. 2) hier scherp is, ligt de onderstelling voor de hand dat het kwik een reeds zoo spitse rand vormt dat hieraan een voor veldemissie voldoend hooge veldsterkte wordt bereikt. Het uittrekmechanisme van Tonks en de daarmee gepaard gaande ontsteekvertraging blijven dan achterwege.

Resumeerende kunnen we het in het begin geschetste verloop van het ontsteekproces als volgt preciseeren:

De positieve spanning op de ontsteker veroorzaakt een electrisch veld, dat aan het kwikoppervlak (in het geval van een bolle meniscus) niet sterk genoeg is voor veldemissie, doch wel om dit oppervlak

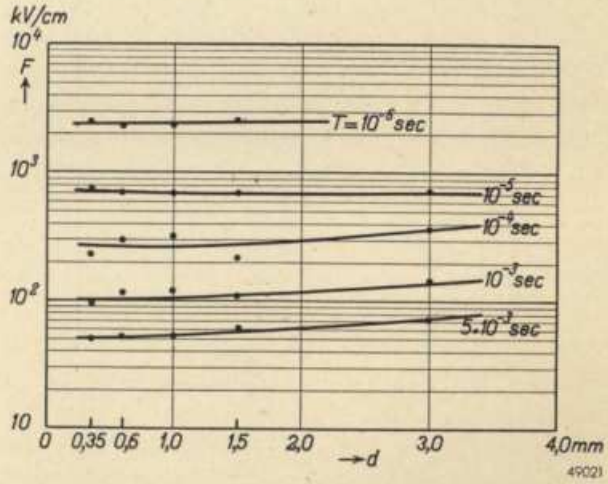


Fig. 12. De veldsterkte F die noodig is om een bepaalde ontsteekvertraging T te krijgen, blijkt weinig af te hangen van de wanddikte d van de capacitieve ontsteker.

instabiel te maken. Hierop aanwezige heuvels van thermische oorsprong worden tot spitse punten uitgetrokken, waarvoor een zekere tijd noodig is (de ontsteekvertraging). Aan deze punten bereikt

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de veldsterkte waarden, die tot electronenemissie aanleiding geven. De electronenstroom loopt langs de ontstekerwand, waarschijnlijk voortgeleid door secundaire emissie, naar een anode. De in de kwikpunten geconcentreerde stroom veroorzaakt Joule-verwarming; ten gevolge hiervan wordt er eenige kwikdamp ontwikkeld, die de overgang van de ontlading in een boog in de hand werkt.

Toepassingen van relaisbuizen met capacitieve ontsteker

In het begin van dit artikel werd reeds de gelijkrichter genoemd als een object waarbij bestuurde ontsteking bepaalde voordeelen biedt boven andere methoden. Bovendien echter zijn er nog vele toepassingsmogelijkheden van relaisbuizen als schakelaar, voor (al of niet periodiek herhaalde) stroomstooten van groote intensiteit en korte duur. Op verschillende gebieden der techniek heeft men dergelijke stroomstooten noodig, bijv. voor stroboscopische belichting, voor het punt- en naadlasschen, voor zenders van „radar"-installaties, enz. Een kwikkathode kan zonder schade stroomen van duizenden ampere emitteeren. Bij vele der toepassingen is de duur van de stroomstooten zoo klein, vergeleken met de tijd die tusschen de stroomstooten verloopt, dat de over een lange tijd gemiddelde waarde van de stroom vele malen kleiner is dan de stroompiek. Daar het deze gemiddelde waarde is die, tezamen met de boogspanning, de warmte-ontwikkeling in de buis bepaalt, kunnen de afmetingen hiervan relatief klein worden gehouden.

Een voorbeeld van een relaisbuis voor een hooge topstroom, doch een veel geringere gemiddelde stroom, toont *fig. 13*. Voor deze buis, die o.a. als schakelaar in een stroboscoop [12]) dienst doet, zijn deze waarden 2000 A resp. enkele ampere. De eigenaardige vorm van de buis is een gevolg hiervan dat niet alleen de kathode, doch ook de anode en de hulpanode uit kwik bestaan. In principe zouden deze beide laatste electroden van metaal of grafiet kunnen worden vervaardigd; het is dan echter onvermijdelijk dat het ontstekeroppervlak op den duur door een laagje verstoven anodemateriaal wordt verontreinigd, hetgeen aanleiding kan zijn tot onregelmatige ontsteking. Daarom is er van uitgegaan dat het inwendige oppervlak van de buis slechts uit kwik, glas en kwarts mag bestaan, zoodat het schoonblijven van de ontsteker is gewaarborgd.

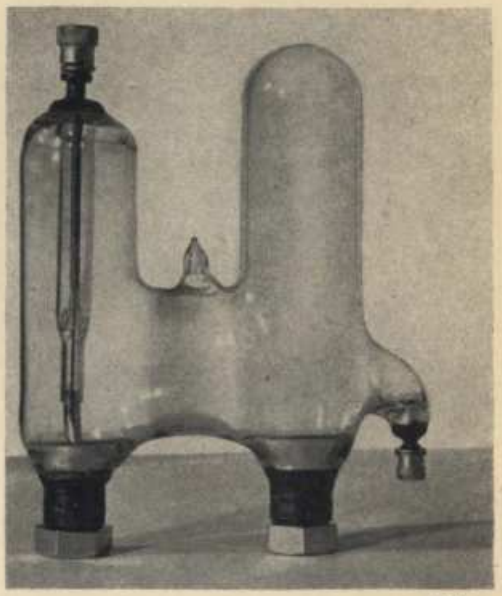


Fig. 13. Relaisbuis met kwikkathode (links) en capacitieve ontsteker. De anode en de hulpanode (rechts) bestaan eveneens uit kwik om verontreiniging van de ontsteker te vermijden. De buis, waarvan de hoogte ca 18 cm is, kan stroomimpulsen tot 2000 A doorlaten. Met het oog op de toelaatbare temperatuur is de gemiddelde stroomsterkte begrensd tot ca 1,5 A bij natuurlijke koeling van de buis, en tot ca 3,5 A bij gebruik van een ventilator.

[12]) Beschreven in Philips techn. T. **8**, 25, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

HET BEPALEN VAN DE LICHTVERDEELING EN DE LICHTSTROOM VAN BUNDELLICHTEN

door J. BERGMANS en H. A. E. KEITZ.

535.245.24:628.932

In ieder lichttechnisch laboratorium beschikt men over apparaten om de lichtverdeeling op te nemen van lichtbronnen, die hun licht naar alle kanten uitstralen. Bij het gebruik daarvan hangt men de lichtbron in een vaste stand, men meet de lichtsterkte in eenige meridiaanvlakken, teekent een polaire grafiek van de lichtverdeeling en berekent daaruit (gewoonlijk met behulp van een Rousseau-diagram) de totale lichtstroom. Bij bundellichten kan deze methode niet ongewijzigd worden toegepast. Heeft men met een klein bundellicht te doen, dat bovendien een zeer smalle bundel uitzendt, dan kan men de lichtbron vast opstellen en de lichtverdeeling vastleggen door een aantal isoluxkrommen op een projectiescherm, loodrecht op de optische as van het bundellicht. Hieruit kan men dan door integratie de lichtstroom vinden. In alle andere gevallen moet men de fotometer vast opstellen en het bundellicht zoo bewegen, dat achtereenvolgens elk deel van de bundel op de fotometer wordt geworpen. Twee verschillende typen van draaiapparaten worden daarbij gebruikt. Uit de meetresultaten wordt dan een isolichtsterktediagram afgeleid. Alvorens men hieruit de lichtstroom kan bepalen, moet dit op een plat vlak worden afgebeeld. Daarbij kan de sinusoïdale methode en de azimuthale afbeelding volgens Lambert gebruikt worden, die beide oppervlakte-evenredig zijn. Het geeft voordeelen, wanneer de metingen zoo worden ingericht, dat de opeenvolgende meetrichtingen liggen op een kegeloppervlak rondom de optische as van het bundellicht. Om dit mogelijk te maken is in het Philips Lichttechnisch Laboratorium een speciaal draaiapparaat geconstrueerd en in gebruik genomen, waarvan in dit artikel een beschrijving wordt gegeven.

Inleiding

Voor een juiste beoordeeling van de eigenschappen van een lichtbron moet men niet alleen letten op de totale hoeveelheid licht, die zij uitzendt, maar evenzeer op de wijze, waarop het licht over de verschillende richtingen verdeeld is.

Veelal is de lamp — de eigenlijke lichtbron — bij het gebruik in een armatuur geplaatst. Wij zullen in dit artikel de benaming lichtbron zoowel voor de lamp als voor de combinatie van een lamp met haar armatuur gebruiken.

In het algemeen heeft men te maken met lichtbronnen, die hun licht alzijdig, althans in een zeer groote ruimtehoek uitstralen. Reeds lang kent men apparaten en zijn er methoden uitgewerkt om voor deze lichtbronnen de lichtverdeeling en de lichtstroom te bepalen.

In dit artikel zullen we ons echter in hoofdzaak bezig houden met lichtbronnen, waarbij de lichtstroom in een vrij smalle bundel wordt uitgezonden. Men noemt deze „bundellichten". Om een voorbeeld te geven van zulk een bundellicht, herinneren we aan een vroeger beschreven armatuur met een watergekoelde kwiklamp voor vliegveldverlichting [1]). Daarbij is de bundel plat en waaiervormig: verticaal bedraagt de spreidingshoek 2 maal ongeveer $^1/_2{}^\circ$ en horizontaal 2 maal ca 40°. Ook bij gevelverlichting en dergelijke vinden bundellichten een ruime toepassing.

Wij zullen in dit artikel uiteenzetten, dat de bovengenoemde methoden bij bundellichten eenige wijziging behoeven en we zullen methoden beschrijven, waarmee men in dit geval de lichtverdeeling kan opnemen en de totale lichtstroom bepalen.

Het bepalen van de lichtverdeeling en de totale lichtstroom van lichtbronnen met een alzijdige lichtuitstraling

Om te beginnen willen we in het kort in herinnering brengen, hoe men bij lichtbronnen, die naar alle kanten licht uitstralen, gewoonlijk de lichtverdeeling en de totale lichtstroom bepaalt.

De meest voor de hand liggende manier is, dat men de lichtbron in een vaste stand, bij voorkeur haar normale gebruiksstand, ophangt en daarna de lichtverdeeling in een aantal verticale vlakken, die door de lichtbron gaan, na elkaar meet. Naar analogie van de benaming, die in de aardrijkskunde gebruikelijk is, noemt men deze vlakken meridiaanvlakken. Het licht van de vaststaande lichtbron wordt met behulp van een in een meridiaanvlak verplaatsbare spiegel of zoo noodig door middel van meer dan één spiegel in een fotometer geworpen. Sinds de invoering van de fotocel doet men het ook wel zoo, dat men dit instrument op een lange draaiarm bevestigt en deze in de meridiaanvlakken rondom de lichtbron draait.

Men kan de in een bepaald meridiaanvlak gevonden lichtsterkten nu in een polair diagram

[1]) Th. J. J. A. Manders, Philips techn. T. 6, 33, 1941.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

uitzetten. De lichtbron wordt in het middelpunt gedacht en de lengte van de voerstraal geeft aan, welke lichtsterkte I in een bepaalde richting gemeten is. *Fig. 1* geeft een voorbeeld van zulk een diagram.

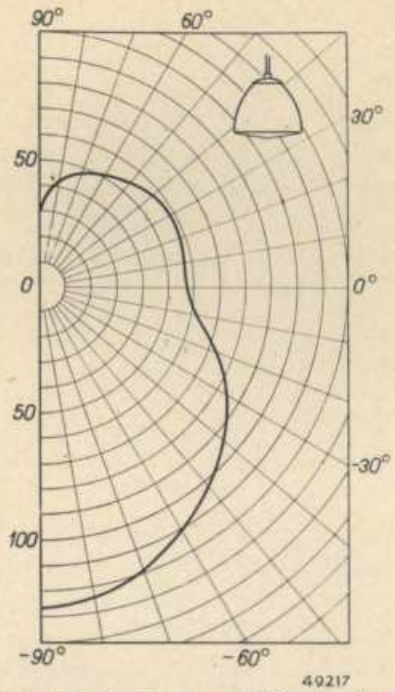


Fig. 1. Een polair diagram van de lichtverdeeling van een lichtbron in een meridiaanvlak. De voerstraal in een bepaalde richting is evenredig met de in die richting gemeten lichtsterkte, welke uitgedrukt is in kaarsen. De opgegeven getallen gelden voor een lichtbron met een lichtstroom van 1000 lumen. In overeenstemming met de notatie, die in de tekst gebruikt is, hebben we een horizontale lijn als nulrichting genomen en daarvandaan de hoeken naar boven van 0° tot 90° en naar beneden van 0° tot −90° geteld. In de lichttechniek gebruikt men meestal een verticale nullijn en telt dan de hoeken van beneden naar boven van 0° tot 180°. In de bovenhoek van de figuur is het armatuur, waarop dit diagram betrekking heeft, geteekend.

Wanneer de lichtbron nu rotatiesymmetrisch is, zal ieder meridiaanvlak hetzelfde polaire diagram opleveren.

De totale lichtstroom van een lichtbron is de lichtstroom (d.i. de hoeveelheid licht, die per seconde passeert) door een boloppervlak, dat deze lichtbron geheel omgeeft. De straal r van deze bol moet zoo groot gekozen worden, dat de lichtbron uit ieder punt van het boloppervlak als een lichtgevend punt in het middelpunt van de bol beschouwd mag worden. Indien $d\Phi$ de lichtstroom is binnen een infinitesimaal kleine ruimtehoek $d\omega$, die een oppervlakje $r^2 d\omega$ van de bol omsluit, dan is $d\Phi = I d\omega$.

We hebben boven het begrip meridiaanvlakken ingevoerd. We zullen nu de analogie met de geografische benamingen nog verder doorvoeren door de hoekcoördinaat in een vlak loodrecht op de as, die met de geografische lengte correspondeert, de lengte l te noemen en de coördinaat loodrecht hierop, die met de geografische breedte overeenkomt, de breedte b.

De totale lichtstroom van een lichtbron is de integraal van $I d\omega$, waarvoor we dus vinden:

$$\Phi = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos b \, db \int_{0}^{2\pi} I \, dl \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

In het geval van een rotatiesymmetrische lichtbron is I onafhankelijk van l, zoodat (1) overgaat in

$$\Phi = 2\pi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I \cos b \, db \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Het berekenen van deze integraal gebeurt gewoonlijk volgens een grafische methode, die van het Rousseau-diagram. In *fig. 2* is toegelicht, hoe dit diagram uit een polair diagram ontstaat. Daartoe is een lijn pq getrokken evenwijdig aan de verticale as van het polaire diagram, en rechts daarvan is een kromme geteekend met $r \sin b$ en I als coördinaten. Het oppervlak, ingesloten tusschen deze kromme, de zooeven genoemde rechte en de twee geteekende horizontale lijnen pp_1 en qq_1, is evenredig met de lichtstroom Φ. Dit oppervlak kan met een planimeter bepaald worden.

Wanneer de lichtbundel niet rotatiesymmetrisch is, kan de methode van het Rousseau-diagram in deze vorm niet worden toegepast, omdat ieder meridiaanvlak dan een andere polaire kromme oplevert. Wil men toch van dit diagram gebruik maken om de totale lichtstroom te bepalen, dan

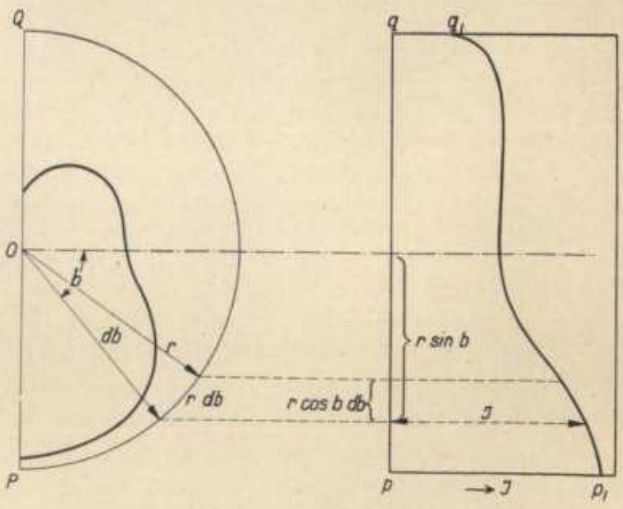


Fig. 2. De berekening van de totale lichtstroom van een rotatiesymmetrische lichtbron met behulp van het Rousseau-diagram uit de polaire grafiek van de in een meridiaanvlak gemeten lichtsterkteverdeeling. Hierbij is r de straal van de bol, die om de lichtbron gedacht wordt, b de breedte in het gebruikte coördinatenstelsel en I de gemeten lichtsterkte. Het oppervlak van de figuur pp_1q_1q is evenredig met de totale lichtstroom Φ.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

moet men de beschikking hebben over lichtsterktemetingen, die verricht zijn in kegeloppervlakken, beschreven om een bepaalde voor de meting gekozen as. Men zou dan voor zulk een kegeloppervlak de gemiddelde lichtsterkte I_b moeten bepalen en in formule (2) I vervangen door I_b. We komen hierop nog terug.

Vooral bij niet rotatiesymmetrische lichtbronnen past men vaak een andere methode toe. Men maakt dan gebruik van een isolichtsterktediagram. Om zulk een diagram te verkrijgen, stelt men zich om de lichtbron weer een bol voor met een zoo groote straal, dat uit ieder punt van zijn oppervlak de lichtbron als een lichtgevend punt beschouwd kan worden. Men stelt zich voor, dat uit ieder punt van de bol de lichtsterkte van de lichtbron bepaald wordt en dat men op het boloppervlak de punten, van waaruit dezelfde lichtsterkte gevonden werd, door een isolichtsterktekromme verbindt. Voor de practische uitvoering kan men met een fotometer weer een aantal meridiaanvlakken doormeten.

Het is mogelijk uit zulk een diagram door integratie de totale lichtstroom af te leiden door het oppervlak van de strook tusschen twee isolichtsterktekrommen met de bijbehoorende lichtsterkte te vermenigvuldigen en de uitkomst voor alle strooken te sommeeren. Maar wanneer men de planimeter wil gebruiken om het oppervlak van een strook te bepalen, doet zich de moeilijkheid voor, dat deze isolichtsterktekrommen op een bol liggen. Men moet dan eerst van dit diagram een afbeelding in een plat vlak maken en deze afbeelding moet „oppervlakte-evenredig" zijn. We stippen dit hier slechts even aan, omdat we er in het vervolg van dit artikel nog op terugkomen.

We stellen nu de vraag, of het mogelijk is de beschreven methoden ook toe te passen op bundellichten.

Meting met een vaststaand bundellicht en een bewegende fotometer

Is het mogelijk de lichtverdeeling van een bundellicht op te nemen door dit vast op te stellen en met een fotometer achtereenvolgens verschillende meridiaanvlakken door te meten? Theoretisch is dat zonder twijfel het geval. En men zou dan voor elk van deze vlakken een polair diagram kunnen teekenen. Maar doordat de bundel gewoonlijk in één of meer richtingen zeer smal is, is dit in de practijk heel moeilijk uit te voeren. Men denke maar aan het boven gememoreerde voorbeeld van een bundellicht, waarbij de spreidingshoek in verticale richting tweemaal ongeveer $^1/_2{}^\circ$ is. Maar wanneer men in een of meer meridiaanvlakken geen betrouwbare polaire kromme kan teekenen, dan kan men ook geen Rousseau-diagram gebruiken en evenmin een isolichtsterktediagram construeeren. De bovengeschetste methoden zijn dus bij bundellichten in het algemeen niet bruikbaar.

Daar bundellichten hun lichtstroom slechts in een smalle bundel uitzenden, is er nog een andere meetmethode denkbaar, waarbij de lichtbron ook vast opgesteld is. Men plaatst daarbij een vlak loodrecht op de optische as van het bundellicht (dit vlak noemt men meestal het projectiescherm, zie *fig. 3*), men meet de verdeeling van de verlichtingssterkte in dit vlak en brengt die in

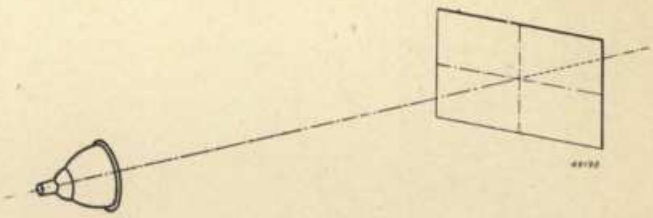


Fig. 3. Een bundellicht met een „projectiescherm", dat loodrecht op de optische as is aangebracht.

teekening. Daar de fotocel, waarmede men deze meting kan verrichten, de verlichtingssterkte als direct meetresultaat geeft, is het logisch de lichtverdeeling van het bundellicht in dit geval vast te leggen door een aantal isoluxkrommen (lijnen van gelijke verlichtingssterkte) op het projectiescherm.

Daar de verlichtingssterkte de lichtstroom per eenheid van oppervlakte is, kan men nu op eenvoudige wijze de lichtstroom, die de lichtbron uitzendt, bepalen. Men behoeft daartoe slechts het oppervlak tusschen telkens twee isoluxlijnen te planimetreeren en met de gemiddelde verlichtingssterkte van dit gebied te vermenigvuldigen.

Deze meetmethode met een projectiescherm vindt in de practijk toepassing. Zij wordt bijv. gebruikt bij rijwiel- en autolantaarns. Men kan daarbij voldoend nauwkeurige resultaten bereiken, wanneer het projectiescherm 6 à 8 meter van de lichtbron geplaatst wordt.

Deze methode kan echter alleen worden toegepast bij kleine lichtbronnen, waarvan bovendien de bundel een kleine spreidingshoek heeft. De oorzaak daarvan is, dat het lichtgevende lichaam niet puntvormig is, maar eindige afmetingen heeft. Welke invloed heeft dit op de bundel? De armatuur van het bundellicht bestaat uit een systeem van lichtreflecteerende of -brekende oppervlakken, in vele gevallen een rotatieparaboloïde, zooals in *fig. 4* is aangegeven. De, hier bolvormige, lichtbron is nu zoo opgesteld, dat haar middelpunt samenvalt met

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

het brandpunt van deze paraboloïde. Het gedeelte van het van de bol afkomstige licht, dat in een punt P_1 de reflector R treft, wordt als een conische bundel teruggekaatst. Geen licht uit deze bundel treft binnen een bepaalde afstand a van de reflector de as. Voor een punt P_2 op de rand van de reflector

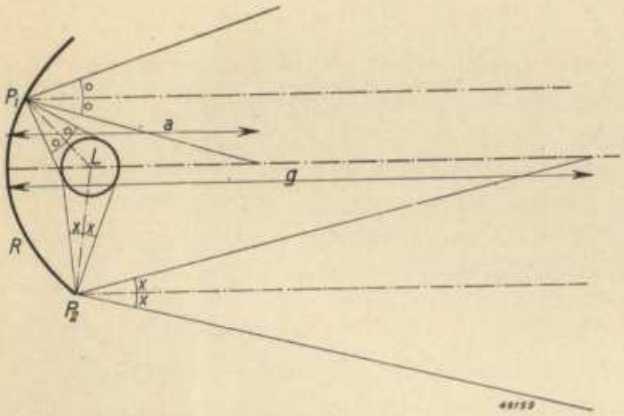


Fig. 4. Een bolvormige lichtbron L met het middelpunt geplaatst in het brandpunt van de reflecteerende rotatieparaboloïde R. Van de bundel, die in P_1 wordt teruggekaatst, zal geen licht de as bereiken binnen een afstand a van de reflector. Voor een punt P_2 op de rand van de reflector bereikt a zijn maximale waarde g, de zg. fotometrische grensafstand.

bereikt a zijn maximale waarde g, de zg. fotometrische grensafstand. In punten op de as, die binnen deze afstand tot de reflector liggen, is het licht niet van de geheele reflector afkomstig, doch alleen van de meer centraal gelegen gedeelten. Wanneer men de lichtverdeeling van een bundellicht wil bepalen, moet het projectiescherm worden aangebracht op een zoodanige plaats, dat de daar gemeten lichtsterkte onafhankelijk is van de afstand tot de lichtbron. Wij zullen niet verder ingaan op de vraag, wat, om dit te bereiken, de minimale afstand tusschen lichtbron en projectiescherm moet zijn, maar we volstaan met de opmerking, dat deze afstand afhangt van de afmetingen van het lichtgevende lichaam en van de middellijn en de brandpuntsafstand van de reflector en dat hij in elk geval grooter dan de fotometrische grensafstand g moet zijn.

Bij bundellichten met groote afmetingen (bijv. zoeklichten) bedraagt de orde van grootte van de fotometrische grensafstand honderden meters. Het zal duidelijk zijn, dat men dan zelfs bij een bundel met een relatief geringe spreidingshoek de bovengeschetste meetmethode niet kan toepassen. Het projectiescherm zou veel te groot worden. En dit geldt a fortiori wanneer men te doen heeft met een bundellicht, dat in een bepaalde richting (bijv. horizontaal) een groote spreiding heeft.

Meting met een vaststaande fotometer en een bewegend bundellicht

Wanneer de methode met het projectiescherm niet toegepast kan worden, pleegt men een andere weg te volgen. Men stelt de fotometer vast op en draait het bundellicht om een horizontale en een verticale as, zorg dragend, dat op deze wijze achtereenvolgens ieder deel van de bundel op het meettoestel geworpen wordt. Hierbij moet men evenzeer met de fotometrische grensafstand rekening houden. Voor zoeklichten, zooals die bijv. op vliegvelden gebruikt worden, kan daardoor de lichtverdeeling — met het oog op de groote meetafstand — in vele gevallen niet in het laboratorium bepaald worden. Dit moet in het vrije veld geschieden.

Uit de aflezingen van de fotometer kan men nu een isolichtsterktediagram construeeren, zooals in het begin van dit artikel is uiteengezet. Deze isolichtsterktekrommen liggen op een boloppervlak. Zoolang de bundelspreiding niet grooter is dan 5° naar alle zijden rondom de as, kan men zonder bezwaar deze krommen als lijnen in een plat vlak beschouwen. Men kan dan op de bovenbeschreven manier door middel van integratie uit het diagram de lichtstroom bepalen.

Indien de spreiding van de bundel echter grooter is, zouden de op deze manier verkregen uitkomsten te onnauwkeurig worden. Men moet dan, alvorens een planimeter te gebruiken, van het isolichtsterktediagram een afbeelding in een plat vlak maken op een van de manieren, die we in de volgende paragraaf bespreken.

In de literatuur worden twee typen van draaiapparaten beschreven. Het toestel kan zoo gemaakt zijn, dat de horizontale draaiingsas gelagerd ligt in bussen, die in het vaste frame liggen. Het apparaat draait nu eerst om deze vaste horizontale as en dan nog om een as, die in de beginstand verticaal staat en die de draaiing om de horizontale as medemaakt (*fig. 5*). Men kan echter ook de verticale as in vaste lagers leggen en de horizontale as de beweging om de verticale as laten uitvoeren (*fig. 6*). Dit is het tweede type draaiapparaat. Beide soorten toestellen komen in lichttechnische laboratoria voor. Er bestaat geen internationale afspraak, welke uitvoering men als de normale zal beschouwen. Dit is te betreuren, want indien in de literatuur een isolichtsterktediagram gegeven wordt, weet men nu zonder nadere mededeeling niet met welke soort van meetapparatuur de lichtsterkteverdeeling opgenomen is, en daardoor kan, zooals hieronder nog zal blijken, in sommige gevallen aan de vermelde resultaten een verkeerde uitleg worden gegeven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Wanneer we willen nagaan welk verschil het in de vorm van een isolichtsterktediagram maakt, of een toestel van het eene of van het andere type gebruikt wordt, moeten we ons wel goed realiseeren, dat we een diagram willen teekenen, dat aangeeft welke lichtsterkte het bundellicht uitstraalt onder een bepaalde hoek met de as van het bundellicht. Bij het opstellen van het diagram staat dus in onze gedachten het bundellicht vast en zetten we de hoekafwijkingen uit, waaronder gemeten werd. Bij de meting staat echter inderdaad de fotometer vast en draait het bundellicht. Wanneer het bundellicht dus naar „rechts boven" gedraaid staat, heeft de meetrichting ten opzichte van de bundelas een afwijking naar „links onder". Vervolgens moeten we eerst bespreken op welke wijze het zooeven genoemde diagram in een plat vlak kan worden geteekend.

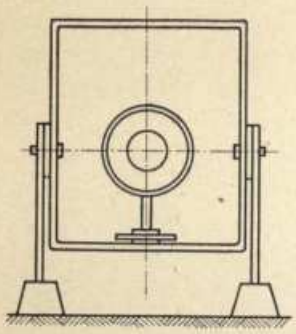


Fig. 5

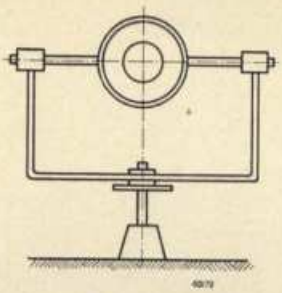


Fig. 6

Fig. 5. Een meettoestel, waarbij het bundellicht draait om een vaste horizontale as en verder nog om een as, die in de beginstand verticaal staat en de draaiing om de horizontale as medemaakt.
Fig. 6. Een meetapparaat, waarbij de lichtbron draait om een vaste verticale as en om een horizontale as, die de beweging om de verticale as meemaakt.

Het afbeelden van bolfiguren in een plat vlak

Wanneer men zich in een lichttechnisch laboratorium afvraagt, op welke wijze een isolichtsterktediagram, zooals dat op een boloppervlak is bepaald, het best in een plat vlak kan worden afgebeeld, dan is dit geen nieuw probleem. Het is in wezen hetzelfde vraagstuk, waar iedere geograaf voor komt te staan, wanneer hij een landkaart moet maken. Euler heeft reeds bewezen, dat het niet mogelijk is een afbeelding van bolfiguren op een plat vlak te maken, waarbij zoowel de vorm als de oppervlakte der figuren natuurgetrouw wordt weergegeven. Er zijn echter verschillende afbeeldingsmethoden in gebruik, waarbij of de eene of de andere eigenschap der figuur tot haar recht komt.

De sinusoïdale afbeelding

Een bekende methode in de geografie is de zg. sinusoïdale afbeelding. Wanneer we een punt op een bol (met straal r) aanduiden met de bolcoördinaten: lengte l en breedte b, dan wordt dit punt bij deze methode in het platte vlak bepaald door de vlakke coördinaten:

$$x = rl \cos b, \qquad y = rb.$$

Men maakt in de fotometrie veel gebruik van deze sinusoïdale afbeelding, omdat deze het voordeel heeft, dat zij oppervlakte-evenredig is.

We zullen deze sinusoïdale afbeeldingsmethode gebruiken om de isolichtsterktediagrammen, die men verkrijgt op grond van waarnemingen resp. met de toestellen van fig. 5 en 6, met elkaar te vergelijken.

Bij het toestel van fig. 5 hebben we te doen met een systeem van bolcoördinaten, waarbij men de draaiingshoek om de horizontale as als lengte en de draaiing om de andere as als een beweging in de breedte kan beschouwen. De polen van dit systeem liggen in de horizon in een richting loodrecht op de optische as van het bundellicht en de aequator gaat door het zenith. Bij het draaien om de verticale as beschrijft de meetrichting in het systeem meridiaancirkels en bij het draaien om de horizontale as breedtecirkels. In *fig. 7* ziet men hoe deze meridiaancirkels en breedtecirkels in sinusoïdale projectie worden voorgesteld.

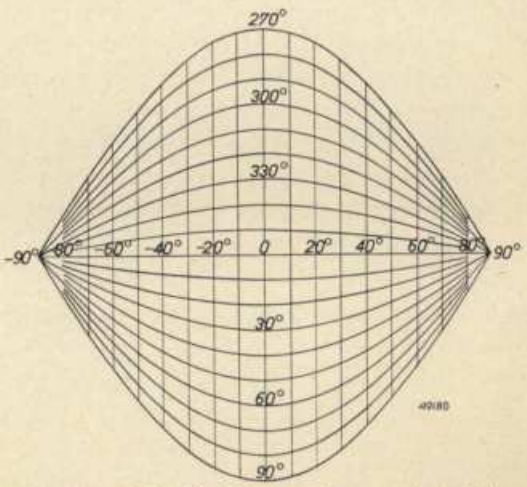


Fig. 7. De sinusoïdale afbeelding van het graadnet behoorende bij het meettoestel van fig. 5.

Bij het apparaat van fig. 6 moet men de draaiing om de vaste verticale as als een beweging in lengte beschouwen en de draaiingshoek ten opzichte van de andere as als breedte. De polen vallen samen met het zenith en het nadir en de aequator valt samen met de horizon. Bij een draaiing om de horizontale as beschrijft de meetrichting meridianen en bij

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

draaiing om de verticale as breedtecirkels. In *fig. 8* is het graadnet, dat correspondeert met de bewegingen in dit stelsel, sinusoïdaal afgebeeld, terwijl eenige meridiaancirkels en kleine cirkels uit fig. 7 ter vergelijking in deze figuur met stippellijnen zijn aangegeven.

Wanneer de spreidingshoek van de bundel klein is, zal het op de berekende lichtstroom niet veel invloed hebben, indien men niet weet met welk draaiapparaat de lichtverdeeling is opgenomen. Maar wanneer men te doen heeft met spreidingshoeken van bijv. 20 graden, dan maakt men een niet toelaatbare fout, wanneer men de metingen, die verricht zijn met een toestel volgens fig. 5, opvat alsof zij afkomstig zijn van het in fig. 6 afgebeelde apparaat.

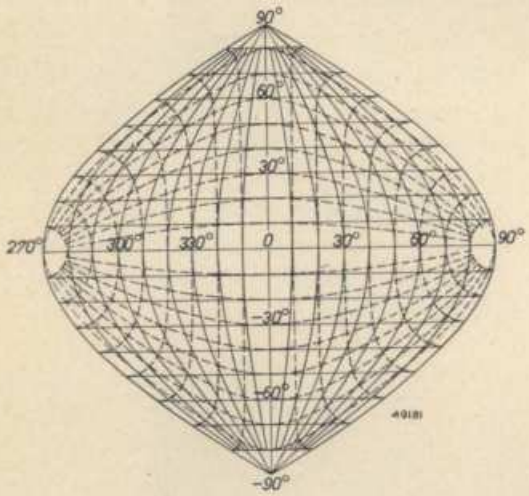


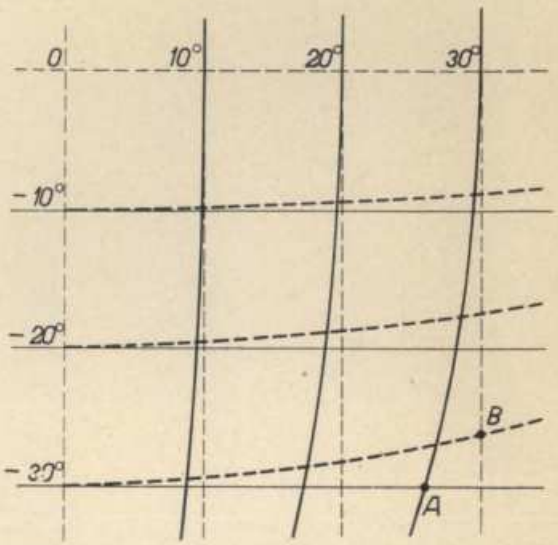
Fig. 8. Op de sinusoïdale afbeelding van het graadnet, behoorende bij het meettoestel van fig. 6, zijn ter vergelijking eenige meridianen en kleine cirkels van fig. 7 als stippellijnen geteekend.

Om van deze fout een indruk te geven hebben we in *fig. 9* het middengedeelte van het diagram van fig. 8 op een grootere schaal voorgesteld. Men ziet daaruit, dat bijv. de richting, die bij het apparaat volgens fig. 6 wordt aangeduid met 30° omhoog en 30° links (punt *A* in fig. 9) een hoek van ca 5 graden maakt met de richting, die bij het toestel van fig. 5 deze zelfde aanduiding heeft (punt *B* in fig. 9). Het is dus wel noodzakelijk, dat men bij meting van bundels met groote spreiding steeds mededeelt met welk type van toestel men gewerkt heeft.

In *fig. 10* is een isolichtsterktediagram van een lichtbron, die haar licht in een vrij smalle bundel uitstraalt, in sinusoïdale projectie afgebeeld. Zooals boven ook reeds is aangegeven, kan men nu de totale lichtstroom van deze lichtbron berekenen door de oppervlakte tusschen telkens twee isolichtsterktekrommen met een planimeter te bepalen en deze te vermenigvuldigen met de geschatte gemiddelde lichtsterkte van deze strook.

De azimuthale afbeelding

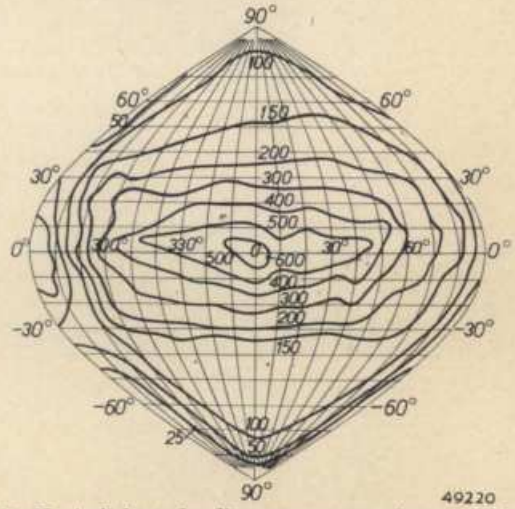
Wanneer men een op een bol gelegen figuur in een plat vlak wil afbeelden, is men niet uitslui-



49219

Fig. 9. Het middengedeelte van het in fig. 8 afgebeelde diagram op grootere schaal voorgesteld. De richting, die bij het apparaat volgens fig. 6 wordt aangeduid met 30° omhoog en 30° links (punt *A*), maakt een hoek van ca 5 graden met de richting, die bij het toestel van fig. 5 deze zelfde aanduiding heeft (punt *B*).

tend aangewezen op de sinusoïdale projectiemethode. Een andere methode, die niet alleen in de aardrijkskunde maar ook in de fotometrie toegepast kan worden, is de azimuthale afbeeldingsmethode volgens Lambert. Deze is ook oppervlakte-evenredig.



49220

Fig. 10. Het isolichtsterktediagram van een „Cornalux"-lamp in sinusoïdale projectie. De lichtsterkte is opgegeven in kaarsen, terwijl de totale lichtstroom van deze lichtbron 132 decalumen bedraagt. Uit het diagram kan men aflezen, dat deze lamp, die voor plafondverlichting gebruikt wordt, haar licht in een vrij smalle bundel uitzendt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Bij deze projectiemethode wordt het oppervlak van een halve bol afgebeeld binnen een cirkel. De meridianen worden geteekend zooals men ze ziet, wanneer men in de richting van de poolas naar een bol kijkt, dus als middellijnen van de randcirkel of aequator. De breedtecirkels worden voorgesteld door cirkels, die concentrisch zijn met de randcirkel.

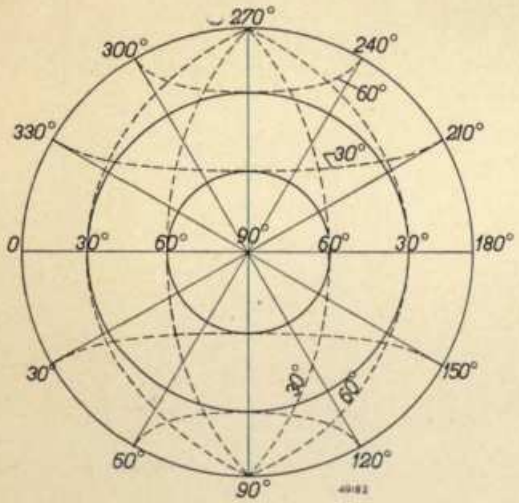


Fig. 11. De azimuthale afbeelding volgens Lambert van een bolgraadnet. De getrokken lijnen stellen eenige meridianen en breedtecirkels voor van een coördinatenstelsel, waarvan de poolas loodrecht op het vlak van teekening staat. De gestippelde lijnen zijn enkele meridianen en breedtecirkels van het coördinatenstelsel, dat past bij het draaiapparaat, dat in fig. 6 afgebeeld is.

Bij de bespreking van de bolcoördinatenstelsels, die resp. bij de toestellen van fig. 5 en fig. 6 passen, hebben we er op gewezen, dat in het eerste geval de poolas een horizontale lijn loodrecht op de optische as van het bundellicht is en in het tweede geval een verticale lijn, eveneens loodrecht op deze optische as.

Er kan echter nog een derde coördinatenstelsel gebruikt worden, waarbij de poolas langs de optische as van het bundellicht in zijn nulstand valt. Dit coördinatenstelsel willen we nu eerst beschouwen. Het is in *fig. 11* afgebeeld. Daarbij zijn eenige meridianen geteekend (middellijnen van de randcirkel) en enkele breedtecirkels. Wanneer we in dit bolcoördinatenstelsel de lengte l' en de breedte b' noemen en de straal van de bol weer r, dan vindt men voor de coördinaten van de vlakke figuur

$$x = 2\,r \sin (45^\circ - {}^1/_2\, b') \cos l'$$
$$\text{en } y = 2\,r \sin (45^\circ - {}^1/_2\, b') \sin l'.$$

Men kan in dezelfde figuur ook het bolgraadnet teekenen, dat behoort bij de beide andere bovengenoemde coördinatenstelsels. We hebben in fig. 11 met stippellijnen eenige meridianen en breedtecirkels aangegeven van het bolcoördinatenstelsel, dat past bij het toestel van fig. 6. De polen van dit stelsel vallen, zooals vroeger beredeneerd is, samen met het zenith en het nadir. Wanneer we de lengte en breedte van dit stelsel weer evenals vroeger met l en b aanduiden, dan vindt men voor de coördinaten van de vlakke figuur:

$$x = r\sqrt{2}\,\frac{\sin l \cos b}{\sqrt{1 + \cos l \cos b}}$$

$$\text{en } y = r\sqrt{2}\,\frac{\sin b}{\sqrt{1 + \cos l \cos b}}.$$

In de afbeelding volgens Lambert kunnen wij nu, evenals bij de sinusoïdale methode, in de richtingen

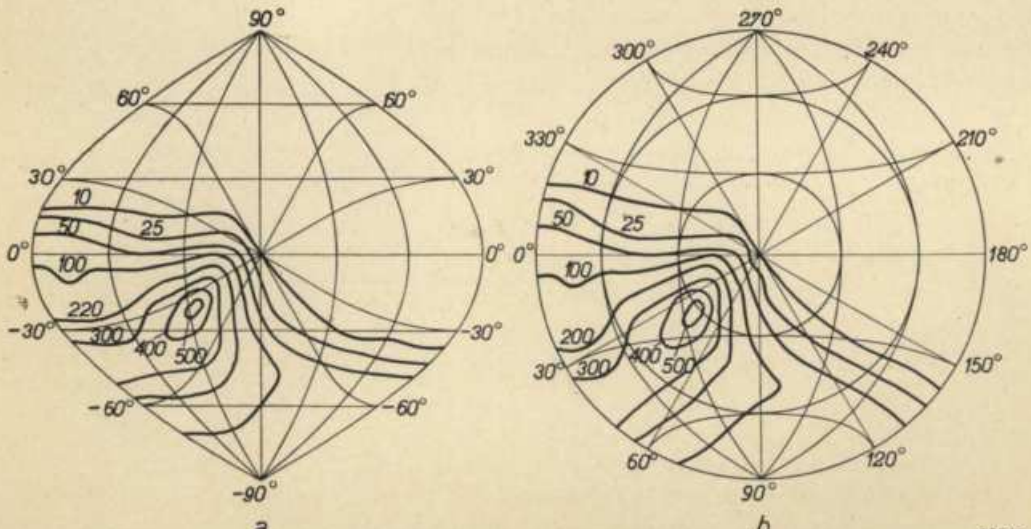


Fig. 12. Het isolichtsterktediagram van een lichtbron voor straatverlichting (armatuur ZE 30), *a*) sinusoïdaal geprojecteerd, *b*) in de azimuthale afbeelding volgens Lambert. Het andere halfrond is symmetrisch met het hier voorgestelde. De lichtsterkte is opgegeven in kaarsen voor een lichtbron met een lichtstroom van 1000 lumen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van de snijpunten der meridianen en breedtecirkels om de 5° of 10° de gemeten lichtsterkte aangeven en daaruit door interpolatie de krommen van gelijke lichtsterkte afleiden. Om de lichtstroom te vinden wordt weer de oppervlakte van de strook tusschen telkens twee isolichtsterktekrommen met een planimeter bepaald en deze uitkomst vermenigvuldigd met de bijbehoorende gemiddelde lichtsterkte. Hiervoor is een nieuwe interpolatie noodig. Het resultaat is dan ook, vooral bij grillige lichtverdeelingen, niet steeds nauwkeurig genoeg.

In *fig. 12* is de lichtverdeeling van het Philips armatuur ZE 30 [2]), dat gebruikt wordt voor wegverlichting, voorgesteld: *a*) in sinusoïdale en *b*) in azimuthale projectie.

Wanneer we de sinusoïdale afbeelding met de azimuthale vergelijken, dan heeft de laatste wel eenige voordeelen. Bij de afbeelding volgens Lambert is de vervorming der figuren gering; een klein cirkeltje op de bol wordt in de nabijheid van het midden van de figuur als cirkel en dicht bij de rand als ellips met een verhouding der assen 2 : 1 afgebeeld. Dit houdt verband met het feit, dat de schaal, waarop één graad in radieele richting moet worden uitgezet, slechts weinig verschilt voor de verschillende deelen van het diagram. Binnen de cirkel met een straal van 30° om de as (dus tusschen $b' = 60°$ en $b' = 90°$) is deze schaal zelfs practisch constant. Het is eveneens een belangrijk voordeel, dat het interpoleeren in het diagram hierdoor zeer wordt vergemakkelijkt. Weliswaar snijden de meridianen en de breedtecirkels van het graadnet, dat bij het toestel van fig. 6 behoort, elkaar in de afbeelding volgens Lambert in het algemeen niet precies loodrecht, doch de afwijkingen van 90° zijn niet zoo groot als bij de sinusoïdale afbeelding het geval is. Ook kan men bij deze laatste projectie niet zien of een bundel rotatiesymmetrisch is, wat bij de afbeelding volgens Lambert wel mogelijk is.

Als we ons rekenschap geven van de vorm van projectie van het graadnet in fig. 11, dan valt het op, dat alle meetrichtingen, die op eenzelfde kegeloppervlak met de optische as van het bundellicht als as liggen, in het diagram door punten van één cirkel (concentrisch met de randcirkel) worden voorgesteld. Dit doet de vraag rijzen, of het niet gewenscht zou zijn de metingen zoo in te richten, dat de opeenvolgende meetrichtingen liggen op een kegeloppervlak rondom de optische as. Men heeft hiervoor een draaiapparaat noodig, dat het mogelijk maakt deze meetresultaten snel en op overzichtelijke wijze te verkrijgen. Zulk een meettoestel gaan we nu bespreken.

[2]) Zie Philips techn. T. 5, 231, 1940.

Het Philips draaiapparaat voor bundellichten

In het Philips Lichttechnisch Laboratorium is een toestel geconstrueerd, dat het op eenvoudige wijze mogelijk maakt de metingen uit te voeren in kegelvlakken om de as. Aan de hand van de schets in *fig. 13* willen we er een beschrijving van geven. De *figuren 14* en *15* toonen twee foto's van dit toestel.

Het bundellicht wordt cardanisch opgehangen door het te bevestigen in de binnenste van twee ringen, welke kunnen draaien om twee stel tappen. Aan de binnenste ring is een vork *E* bevestigd. Door middel van een glijstuk *F* kan deze vork bewogen en vastgezet worden op een stevige gradenboog *G*, welke door middel van een worm om zijn eene uiteinde kan wentelen. De verbinding van het glijstuk en de vork wordt gevormd door een kogel, die nauwkeurig in een cylindrisch gat van het glijstuk past. Een nonius maakt het mogelijk tot op $^1/_8°$ nauwkeurig in te stellen. Verder is aan de vork *E* een beugel aangebracht, waaraan een stelinrichting

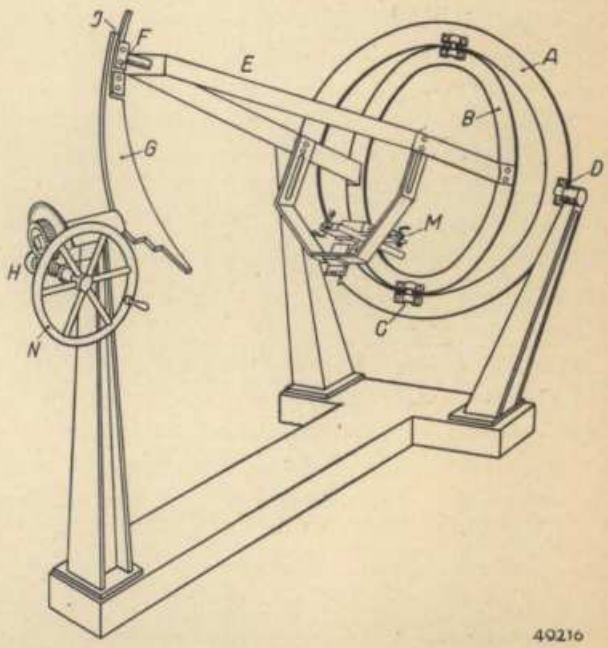


Fig. 13. Schematische voorstelling van het beschreven draaiapparaat voor bundellichten. Het bundellicht wordt cardanisch opgehangen door het te bevestigen in de binnenste van twee ringen *A* en *B*, welke kunnen draaien om de tappen *C* en *D*. Aan de binnenste ring is een vork *E* bevestigd. Door middel van een glijstuk *F* kan deze vork bewogen en vastgezet worden op een gradenboog *G*, die door middel van een worm *H* om zijn eene uiteinde kan wentelen. De verbinding van het glijstuk en de vork wordt gevormd door een kogel, die nauwkeurig in een cylindrisch gat van het glijstuk past. Een nonius *J* maakt het mogelijk tot op $^1/_8°$ nauwkeurig in te stellen. Verder is aan de vork *E* een beugel aangebracht, waaraan een stelinrichting *M* bevestigd is, die uit draaibanksupports bestaat en het mogelijk maakt het bundellicht nauwkeurig in te stellen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

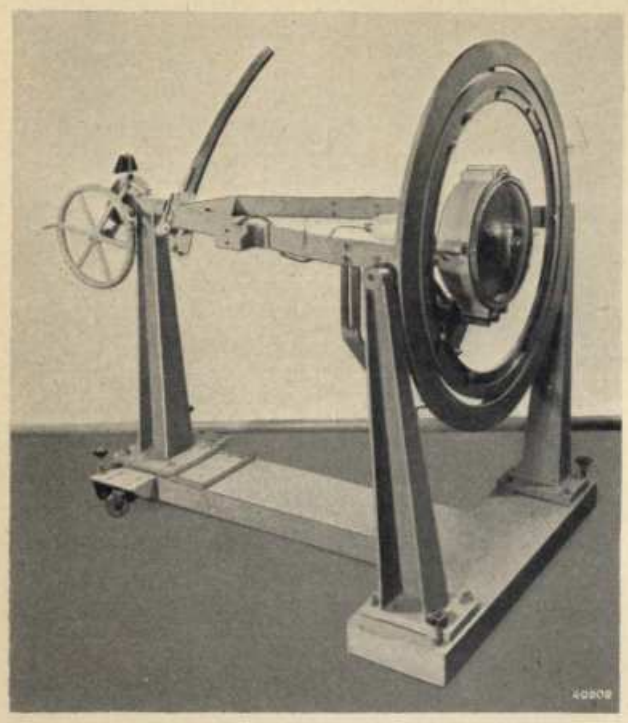


Fig. 14. Het Philips meettoestel, waarop een „Philiflood" bundellicht gemonteerd is.

bevestigd is, die uit draaibank-supports bestaat en het mogelijk maakt het bundellicht nauwkeurig in te stellen.

Wanneer we het glijstuk F instellen op een bepaald aantal graden van de gradenboog, dan kunnen we door deze boog te draaien met de worm, die door een handwiel bewogen wordt, een groot aantal metingen uitvoeren, die alle lichtsterkten aangeven in richtingen, die eenzelfde hoek met de as van de lichtbron maken.

Het gebruik van dit draaiapparaat biedt in de eerste plaats voordeelen, wanneer men de azimuthale projectiemethode wil toepassen. We hebben al opgemerkt, dat bij deze afbeelding alle meetrichtingen, die op eenzelfde kegelvlak liggen, in het diagram voorgesteld worden door punten van één cirkel. Verder zullen alle richtingen, die gemeten worden met eenzelfde stand van het segment G in dit diagram (fig. 11) voorgesteld worden door punten, die op eenzelfde straal uit de oorsprong (O) liggen.

In de tweede plaats is het gebruik van dit instrument gewenscht, wanneer men ook bij bundellichten de lichtstroom met behulp van het Rousseau-diagram wil bepalen. Daarbij moet van alle metingen, die op eenzelfde hoekafwijking van de as betrekking hebben, het rekenkundig gemiddelde bepaald worden. Op deze wijze kan men de gemiddelde lichtsterkte, die het bundellicht in een bepaald kegelvlak bezit, nauwkeurig vinden. Deze wordt dan vervolgens in het Rousseau-diagram verwerkt, op de wijze, die in het begin van dit artikel is uiteengezet.

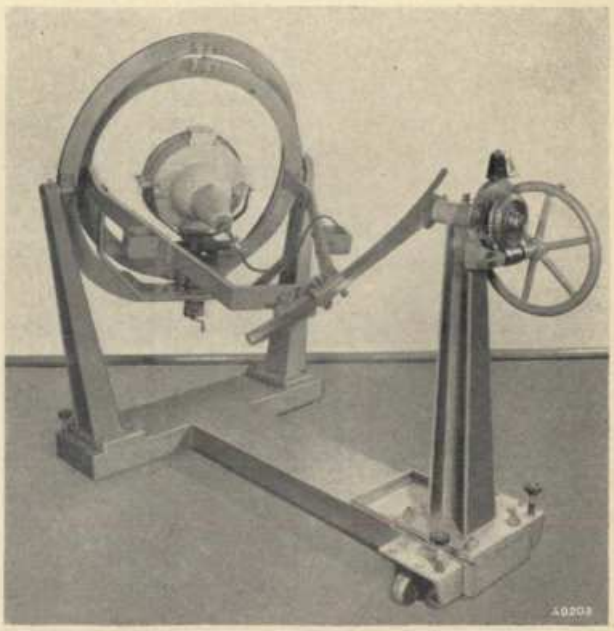


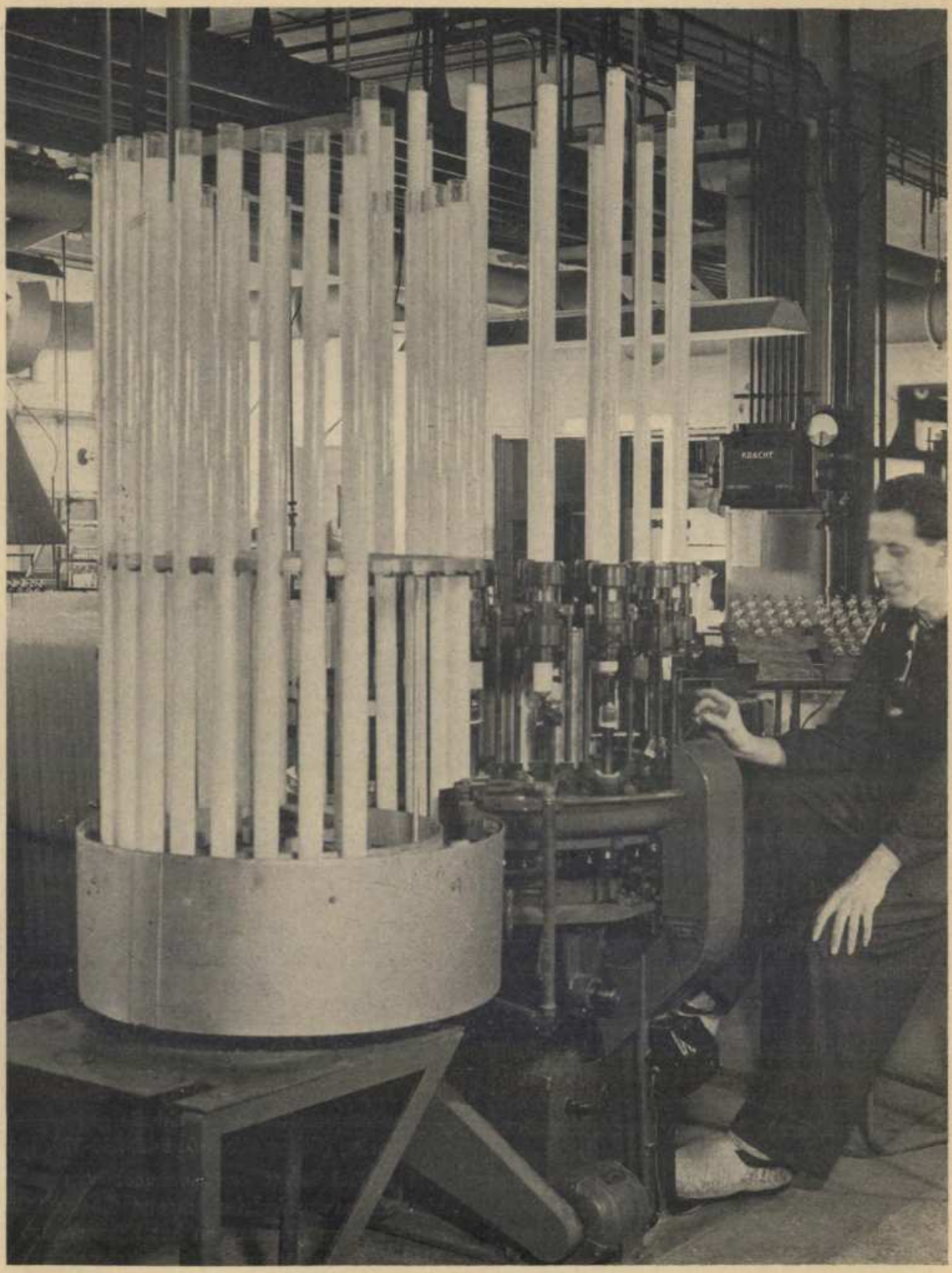
Fig. 15. Het draaiapparaat bij het opnemen van de lichtverdeeling van het bundellicht in een andere stand.

Het bovenbeschreven draaiapparaat maakt het dus mogelijk met behulp van het Rousseau-diagram de lichtstroom van een bundellicht sneller en met een grootere nauwkeurigheid te bepalen dan mogelijk zou zijn met een der toestellen van fig. 5 en fig. 6 met toepassing van de sinusoïdale of de azimuthale projectiemethode.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

MACHINE VOOR HET AUTOMATISCH INSMELTEN DER ELECTRODEN IN BUISVORMIGE FLUORESCENTIELAMPEN



De buis en een voorverwarmd electrodenstel worden boven elkaar in houders op een roteerend carrousel geplaatst (midden). Het insmelten vindt automatisch plaats, door geleidelijk toenemende verhitting der te versmelten randen door branders. In een roteerende koeloven (links vooraan) wordt het ingesmolten buiseinde geleidelijk weer afgekoeld. Hierna wordt de buis omgedraaid en opnieuw op het insmelt-carrousel geplaatst voor het insmelten van het electrodenstel aan het andere einde. Tenslotte gaat de buis voor de tweede maal door de koeloven en is dan gereed voor het pompen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publicaties verstrekt de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, op aanvrage gratis overdrukken. Van de publicaties die met een sterretje * zijn gemerkt, is echter geen voor verspreiding voldoende aantal overdrukken beschikbaar.

1698: D. Polder en J. H. van Santen: The effective permeability of mixtures of solids (Physica **12**, 257-270, 1946).

In vele gevallen is het van belang te weten, hoe de diëlectrische of de magnetische permeabiliteit van een mengsel van stoffen, die in zuivere toestand onderling verschillende permeabiliteiten vertoonen, afhangt van de samenstelling van het mengsel. In dit artikel wordt het geval behandeld, waarin de genoemde stoffen poeders van vaste stoffen zijn, samengepakt in een medium zooals olie, was of lucht. De individueele deeltjes of holten worden ellipsoïdvormig ondersteld. De berekeningen zijn gebaseerd op een benadering, welke in het geval van bolvormige deeltjes tot dezelfde resultaten leidt als met de methode van Böttcher worden verkregen. De invloed van de vorm van de ellipsoïden wordt nagegaan. Er wordt nader ingegaan op de aard der in dit artikel en in andere theorieën over hetzelfde onderwerp gebruikte benaderingen.

1699: M. J. O. Strutt en A. van der Ziel: Signal-noise ratio at v.h.f. (Wireless Engineer **23**, 241-249, 1946).

De twee fundamenteele concepties: correlatie tusschen de stroom- en spanningsfluctuaties en de ontleding van fluctuaties in zuiver harmonische componenten, worden kort besproken. De verhouding van signaal tot geruisch van een versterker met geaarde kathode wordt berekend en de conditie voor minimum geruisch wordt opgesteld. Experimenteele resultaten bevestigen het theoretische resultaat.

Verder worden versterkers met geaard rooster en buizen met snelheidsmodulatie besproken en de aan de buisconstructie te stellen eischen behandeld (uniforme electronenlooptijden en lage diëlectrische en andere verliezen). Bewezen wordt, dat de in uitzicht gestelde reductie ook optreedt in het geval van ontvangst met breede banden. Om het verlies in energieversterking tengevolge van de geruischvermindering te compenseeren kan een geschikte terugkoppeling worden toegepast. Het verband tusschen het in dit artikel ingevoerde ruischgetal en de ruischverhouding (noise ratio) volgens andere auteurs wordt besproken.

1700: B. D. H. Tellegen: Het bepalen van de integratieconstanten bij de berekening van in- en uitschakelverschijnselen (T. Ned. Radiogenoot. **11**, 173-188, 1946).

Een methode wordt ontwikkeld om bij een netwerk, dat een spanningsbron v bevat, onder welks invloed in een bepaalde tak een stroom i vloeit, bij het optreden van discontinuïteiten in v of zijn afgeleiden de daardoor in i en zijn afgeleiden ontstaande discontinuïteiten te berekenen met behulp van de differentiaalvergelijking, welke het verband tusschen i en v aangeeft.

1701*: H. A. Klasens: Transfer of energy between centres in zinc sulphide phosphors (Nature, London, **158**, 306, 1946).

De energie-overdracht tusschen twee soorten centra (bijv. blauwe en groene) in zinksulfidefosforen wordt verklaard door aan te nemen dat, wanneer een centrum van één soort (bijv. blauw) is aangeslagen (doordat het electron is gebracht in de leege „geleidings"band), het „gat" uit het centrum kan worden overgebracht naar een lager gelegen „volle" band en zich dus kan verplaatsen naar een groen centrum. Het omgekeerde proces (groen → blauw) wordt ondersteld zeer onwaarschijnlijk te zijn. Uit de genoemde hypothese worden twee simultane differentiaalvergelijkingen afgeleid, die het aantal aangeslagen centra als functie van de tijd voorstellen. Uit deze vergelijkingen kan de intensiteitsverhouding blauw/groen tijdens bestraling als functie van de bestralingsintensiteit en van de temperatuur worden afgeleid alsmede de afhankelijkheid van bijv. de blauwe emissie van de temperatuur. Het effect van „killers" op het nalichten (groene emissie) wordt op soortgelijke wijze verklaard.

1702: J. Boeke: Ontwikkeling van de electrische meetapparaten in de chemie gedurende de oorlog (Chem. Weekblad **42**, 230-273, 1946).

Dit artikel bevat een overzicht van recente verbeteringen van electrische meetmethoden die in de chemie worden gebruikt, in het bijzonder op het gebied van electrochemie, diëlectrische constanten, vochtbepaling, spectrometrie (absorptie en emissie), chemische analyse, apparaten voor gebruik in de industrie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!